



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
Industrial de Barcelona



# Diseño y optimización del chasis de un vehículo eléctrico autónomo

---

Carlos Martín García y Rafael Mocholí Álvarez

Tutor: Emilio Hernández Chiva

## RESUMEN

El proyecto que se presenta a continuación ha tenido como objetivo principal la realización del diseño y la construcción del chasis de un vehículo eléctrico autónomo. Este proyecto se ha realizado desde marzo hasta junio de 2016 en la Universidad Estatal de Ingeniería Mecánica de Moscú (más conocida por las siglas de su nombre en ruso, MAMI). En la presente memoria se detallan los pasos que se han seguido para conseguir este objetivo y los estudios que se han realizado.

En primer lugar, se muestra un análisis de viabilidad comercial y un estudio de mercado de la situación actual de los vehículos autónomos. A continuación, se explica el diseño conceptual del vehículo que se ha llegado a construir.

Una vez definido el concepto del vehículo que se ha construido, se explican los pasos que se han seguido para diseñar y construir un prototipo con estas características, separando la explicación según las áreas que conforman el chasis: bastidor, sistema de suspensión, sistema de dirección y sistema de frenos.

En cada uno de estos apartados se muestran los conocimientos teóricos necesarios para entender el trabajo realizado, el diseño que se ha realizado y el aspecto final del prototipo finalmente construido.

El diseño del vehículo y de todos sus componentes se ha realizado con el programa *Solidworks* 2015. Este mismo programa también se ha utilizado para realizar las simulaciones de resistencia mecánica del bastidor del vehículo.

También se detalla cómo se ha realizado el proceso de construcción y qué maquinaria se ha utilizado para realizar el prototipo. Se ha incluido también un apartado sobre el impacto medioambiental y otro sobre la posible optimización del chasis.

Por último, se detalla la planificación que se ha seguido para cumplir con éxito este proyecto, así como también se incluye un análisis económico del coste del mismo.

## TABLA DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN .....  | 0  |
| TABLA DE CONTENIDO .....                                 | 2  |
| 1. GLOSARIO .....  | 6  |
| 2. PREFACIO.....   | 7  |
| 2.1. Origen del proyecto .....                           | 7  |
| 2.2. Motivación .....                                    | 8  |
| 2.3. Requisitos previos .....                            | 9  |
| 2.4. Software empleado.....                              | 9  |
| 3. INTRODUCCIÓN.....                                     | 12 |
| 3.1. Objetivos del proyecto .....                        | 12 |
| 3.2. Alcance del proyecto.....                           | 13 |
| 4. EVALUACIÓN PREVIA DEL PROYECTO .....                  | 14 |
| 4.1. Análisis de alcance (SWOT) .....                    | 14 |
| 4.2. Análisis comercial (Competencia, mercado...) .....  | 16 |
| 4.2.1. Estudio de mercado .....                          | 16 |
| 4.2.2. Target comercial.....                             | 19 |
| 5. DISEÑO CONCEPTUAL DEL VEHÍCULO .....                  | 22 |
| 5.1. Concepto de vehículo.....                           | 22 |
| 5.2. Variables y restricciones de diseño.....            | 22 |
| 5.2.1. Distancia entre ejes o Batalla .....              | 23 |
| 5.2.2. Ancho de vías .....                               | 24 |
| 5.2.3. Altura de la base del coche sobre el suelo.....   | 25 |
| 5.2.4. Prestaciones especificadas para el vehículo ..... | 26 |
| 6. BASTIDOR .....  | 28 |
| 6.1. Factores a tener en cuenta .....                    | 28 |
| 6.2. Proceso de diseño y optimización.....               | 30 |
| 6.2.1. Primeros diseños.....                             | 30 |
| 6.2.2. Aproximándose al resultado final .....            | 31 |
| 6.2.3. Primer bastidor válido.....                       | 32 |
| 6.2.4. Bastidor optimizado para la construcción .....    | 33 |
| 6.3. Explicación del proceso de simulación.....          | 33 |
| 6.4. Consideraciones de las simulaciones .....           | 35 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 6.5.    | Simulaciones del primer bastidor válido .....                            | 35 |
| 6.5.1.  | Simulación 1: Bache delantero .....                                      | 35 |
| 6.5.2.  | Simulación 2: Bache trasero .....  | 38 |
| 6.5.3.  | Simulación 3: Impacto frontal .....                                      | 40 |
| 6.5.4.  | Simulación 4: Situación de vuelco .....                                  | 41 |
| 6.5.5.  | Valoración de las simulaciones.....                                      | 43 |
| 6.6.    | Simulaciones del bastidor optimizado para la construcción .....          | 43 |
| 6.6.1.  | Simulación 1: Bache delantero .....                                      | 44 |
| 6.6.2.  | Simulación 2: Bache trasero .....  | 46 |
| 6.6.3.  | Simulación 3: Impacto frontal .....                                      | 48 |
| 6.6.4.  | Simulación 4: Situación de vuelco .....                                  | 50 |
| 6.6.5.  | Valoración de las simulaciones.....                                      | 51 |
| 6.7.    | Suelo del vehículo.....  | 51 |
| 6.8.    | Monturas .....   | 52 |
| 6.8.1.  | Monturas superiores de los amortiguadores delanteros.....                | 53 |
| 6.8.2.  | Monturas de los trapecios de la suspensión .....                         | 53 |
| 6.8.3.  | Monturas del suelo.....  | 54 |
| 7.      | SISTEMA DE SUSPENSIÓN.....   | 55 |
| 7.1.    | Conceptos Básicos .....  | 55 |
| 7.1.1.  | Sistema de coordenadas utilizado .....                                   | 55 |
| 7.1.2.  | Ángulo de caída (o <i>camber</i> ).....                                  | 57 |
| 7.1.3.  | Centro instantáneo de rotación (CIR).....                                | 59 |
| 7.1.4.  | Centro de balanceo (Roll centre).....                                    | 59 |
| 7.1.5.  | Eje <i>Kingpin</i> .....   | 60 |
| 7.1.6.  | Ángulo Caster .....  | 60 |
| 7.1.7.  | Centro de gravedad .....   | 61 |
| 7.1.8.  | Masa suspendida .....  | 61 |
| 7.1.9.  | Masa no suspendida.....  | 61 |
| 7.1.10. | Ángulo de convergencia o divergencia de las ruedas (Toe en inglés) ..... | 61 |
| 7.2.    | Tipos de suspensión .....  | 62 |
| 7.2.1.  | Sistemas de suspensión dependientes.....                                 | 63 |
| 7.2.2.  | Sistemas de suspensión semi rígidos.....                                 | 65 |
| 7.2.3.  | Sistemas de suspensión independientes.....                               | 66 |
| 7.3.    | Diseño del sistema de suspensión del eje trasero del prototipo .....     | 70 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 7.3.1. | Conjunto muelle/amortiguador .....                                    | 71  |
| 7.3.2. | Diseño del brazo longitudinal.....                                    | 75  |
| 7.4.   | Diseño del sistema de suspensión del eje delantero del prototipo..... | 77  |
| 7.4.1. | Manguetas .....   | 78  |
| 7.4.2. | Estudio de la cinemática de la suspensión.....                        | 79  |
| 7.4.3. | Articulaciones de los trapecios .....                                 | 83  |
| 7.4.4. | Alojamiento de los cojinetes esféricos de los trapecios .....         | 84  |
| 7.4.5. | Diseño de los trapecios de la suspensión.....                         | 85  |
| 7.4.6. | Bushings .....  | 88  |
| 7.4.7. | Diseño completo de la suspensión frontal.....                         | 89  |
| 8.     | DIRECCIÓN.....  | 91  |
| 8.1.   | Cremallera de dirección y tie rods .....                              | 91  |
| 8.2.   | Columna de dirección .....  | 93  |
| 8.3.   | Cálculo del radio mínimo de giro. ....                                | 95  |
| 8.4.   | Motor eléctrico de la dirección .....                                 | 97  |
| 8.5.   | Sistema de transmisión .....  | 99  |
| 8.6.   | Sistema de acoplamiento/desacoplamiento del motor .....               | 100 |
| 8.7.   | Resultado final.....  | 108 |
| 9.     | SISTEMA DE FRENADO .....  | 111 |
| 9.1.   | Concepto general del sistema .....                                    | 111 |
| 9.2.   | Sistema de frenos trasero .....                                       | 111 |
| 9.3.   | Sistema de frenos delantero .....                                     | 113 |
| 10.    | PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.....  | 116 |
| 10.1.  | Línea de tiempo.....  | 116 |
| 10.2.  | Materiales empleados en el proceso de construcción: .....             | 118 |
| 10.3.  | Herramientas y maquinaria usada en el proceso de construcción:.....   | 119 |
| 11.    | PLANIFICACIÓN .....   | 121 |
| 12.    | ANÁLISIS DE LOS RECURSOS ECONÓMICOS.....                              | 125 |
| 12.1.  | Coste de los materiales empleados .....                               | 126 |
| 12.2.  | Coste de las horas dedicadas .....                                    | 127 |
| 12.3.  | Otros gastos del proyecto .....                                       | 128 |
| 12.4.  | Coste total .....   | 129 |
| 13.    | ANÁLISIS DE IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....                               | 130 |
| 14.    | CONCLUSIONES .....  | 132 |

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
| 15.   | Bibliografía.....               | 134 |
| 15.1. | Referencias bibliográficas..... | 134 |
| 15.2. | Bibliografía de consulta .....  | 134 |

## 1. GLOSARIO

**CAD:** Computer Assisted Design.

**MAMI:** Por sus siglas en ruso, Universidad Estatal de Ingeniería Mecánica de Moscú.

**EUR/RUB:** Relación del tipo de cambio entre el rublo ruso y el euro. Se toma como valor de referencia 1 Euro.

**FDS:** Factor de seguridad.

**Estado de orden de marcha:** Estado en el que el vehículo está estático, con su peso en vacío más el del conductor (80kg)

## 2. PREFACIO

### 2.1. Origen del proyecto

La colaboración entre la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona y la Universidad Estatal de Ingeniería Mecánica de Moscú (MAMI, por sus siglas en ruso) surgió de un encuentro entre el Dr. Emilio Hernández (profesor de la ETSEIB) y Pablo Emilio Iturralde (decano de MAMI). Meses después, gracias a la competición de motos eléctricas Smart Moto Challenge, esta relación dio pie a una idea: Estudiantes de MAMI y de la ETSEIB intercambiándose para involucrarse en proyectos de ingeniería de otro país, con otra cultura, otra forma de trabajar y otra forma de relacionarse con los compañeros.

Se razonó mucho sobre la naturalidad del proyecto, sobre qué tipo de proyecto sería beneficioso para los estudiantes de ambos países. Aunque se barajó en un principio un proyecto de Formula Student creado a partes iguales entre los dos países, donde una parte se encargaba del diseño y otra de la construcción y de la mecánica del automóvil, fue descartado debido a la flotabilidad del tipo de cambio del rublo ruso y la posibilidad de que las sanciones aplicadas por la comunidad internacional a la Federación Rusa colapsaran el desarrollo del trabajo. Finalmente, a pesar de que la idea inicial era francamente interesante, se optó por un desafío más robusto y menos expuesto a los vaivenes de la situación política mundial. Eso significaba, en otras palabras, que todo el equipo de trabajo estuviera localizado en el mismo campus universitario.

Ya a principios del año 2016, MAMI solicitó ayuda para poder finalizar un proyecto que requería de unas necesidades que podían suplir estudiantes de la ETSEIB. Unos muchachos de segundo año se involucraron en el diseño y la construcción de un vehículo eléctrico y autónomo por una asignatura troncal. Debido a que aún no habían cursado algunas de las asignaturas que podrían haber sido de ayuda, solicitaron ayuda a los talleres de Formula Student MAMI, quienes contactaron con la ETSEIB para solicitar dos estudiantes. Se publicó a los pocos días una oferta en la Bolsa de TFG/TFM y tres alumnos opositaron a estas dos plazas. Finalmente, debido a la complementariedad de los conocimientos, de los campos de trabajo y de la experiencia de los tres, todos ellos fueron seleccionados.

Así fue como nació el proyecto sobre vehículos eléctricos autónomos que se ha desarrollado durante el cuatrimestre de primavera del curso 2015-2016, involucrando, además de las dos



universidades como instituciones, a los dos autores de esta memoria y a un tercer estudiante centrado en la electrónica del prototipo.

## 2.2. Motivación

El mundo evoluciona a una velocidad vertiginosa, la competencia entre trabajadores cualificados es cada vez más alta. Este tipo de proyectos ayuda a los estudiantes a tomar contacto con la realidad del mundo de la ingeniería y a enfrentarse a todos los problemas que los proyectos reales presentan. Diplomas, certificados, cursos... son palabras muy habituales en los currículums actuales, la experiencia en el trabajo o la realización de proyectos de este tipo pueden suponer la diferencia entre ser contratado o no. Además, hechos tan simples como trabajar codo con codo con las personas que hacen realidad los diseños de los ingenieros (soldadores, chapistas, pintores...) aporta una visión global del proceso de fabricación y ayuda a entender las necesidades e inquietudes de todos los integrantes de la cadena de trabajo.

En cuanto a los estudiantes, cada uno tiene sus propias razones para haber ido a Moscú a realizar este proyecto. Como hecho común, las ganas de trabajar en proyectos desafiantes, conocer la tecnología en la que están invirtiendo actualmente grandes compañías millones de euros, subir un peldaño más en la escalera de la formación e inquietud por trabajar en un país extranjero.

Posiblemente uno de los desafíos personales más interesantes es intentar integrarse en un equipo de trabajo que lleva años formado, en una sociedad con fama de ser de las más duras y cerradas, poder sacar adelante el proyecto con una lengua extranjera para toda la gente que formará parte de esta experiencia y sentar la base para que este intercambio sea el primero de muchos.

Hace unos pocos años, novedades que ahora se ven tan básicas en la automoción como el control de tracción, el ABS o la tercera luz de freno eran cosas innovadoras que llegaron para hacerse un hueco en la sociedad y quedarse. El ser humano tiene tendencia a protegerse de todo aquello que intenta dañarle o pone en riesgo su seguridad. Los avances en la rama tecnológica de los automóviles salvan vidas cada día. Con ordenadores cada vez más compactos y potentes, que superan con creces la capacidad de cálculo y de reacción de cualquier persona, el ser humano confía en la eficacia de éstos para su seguridad en casos tan dispares como frenadas de emergencia, detección de amenazas medioambientales (calor extremo que podría afectar al rendimiento del vehículo, posibilidad de hielo en el pavimento...) o algo tan sencillo como saber si los pequeños de la casa llevan el cinturón abrochado. Por causas de las cuales son responsables los conductores

como cansancio, embriaguez, distracciones o hacer caso omiso de las recomendaciones de mantenimiento que el propio vehículo puede llegar a mostrar en la consola, se producen la gran mayoría de los accidentes mortales en las carreteras de nuestro país. Si el ser humano es consciente de sus debilidades y asume que su inteligencia es superada en velocidad de reacción por un ordenador ¿No sería hora de desarrollar los sistemas que permitan reducir a cero el riesgo que corremos a la hora de desplazarnos en coche?

### 2.3. Requisitos previos

Para la realización este trabajo han sido necesarios algunos de los conocimientos que han sido adquiridos a lo largo de los cuatro cursos del Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, así como conocimientos específicos sobre el trabajo que hemos adquirido en Moscú. Además de toda la teoría que ha sido vista y el uso de software aprendido en asignaturas como Mecánica de los Medios Continuos y Resistencia de Materiales, cabe sumar el aprendizaje autónomo realizado durante todos estos años por interés propio y necesidad de ampliación de conceptos.

### 2.4. Software empleado

Se empleó tiempo al comenzar el proyecto para evaluar qué softwares serían utilizados a lo largo del mismo. A continuación, se hace un breve comentario sobre cada uno de ellos:

- **Solidworks 2015:** Tanto para el modelado del bastidor como para el modelado de las mesas de suspensión se ha utilizado la versión de estudiante de Solidworks 2015. Comercializado por primera vez en el año 1999, este programa brindaba en sus inicios la oportunidad de adentrarse en el mundo CAD de una forma sencilla e intuitiva. Con el tiempo se fue consolidando como una gran herramienta que usan empresas de todo el mundo. Permite, además, hacer simulaciones de algunos tipos (eléctricas, mecánicas, de fluidos...).
- **ANSYS Workbench:** ANSYS es uno de los programas de simulación con más fama mundialmente (si no el que más). Fue creado en los años 70 por especialistas en cálculos de elementos finitos y dinámica de fluidos. Fue el primer programa en calcular un mecanismo con un millón de grados de libertad, así como el que fue usado durante la investigación del ataque terrorista del 11-S para simular las condiciones que propiciaron el colapso del World Trade Center.
- **Otros programas:** Se consideró también el uso de otros programas de CAD como SolidEdge y Catia, pero la necesidad de un buen aprendizaje para su correcto uso y el poco tiempo del

que se disponía para realizar el proyecto, propició su eliminación de la lista de posibles softwares.

Finalmente, las dos opciones que se plantearon fueron las siguientes, siendo los razonamientos que propiciaron la elección los que se encuentran a continuación:

- **Opción A:** Uso de SolidWorks para el diseño y modelado de la estructura y uso de ANSYS Workbench para la verificación del modelo.
- **Opción B:** Uso de Solidworks en ambas etapas.

ANSYS Workbench ofrece resultados muy precisos, permite simular todo tipo de situaciones del mundo real (análisis magnéticos, de calor, aerodinámicos, de resonancia...) y aunque grandes problemas de uso, como su lentitud en ordenadores con poca capacidad operativa y la necesidad de exclusividad de la CPU a la hora de realizar cálculos. Se encuentra también el hecho de que la licencia de estudiante sea muy limitada y, si bien no hemos encontrado cifras oficiales precisas, el detalle de que el precio de una licencia individual ronde los 45000€, sumando aparte un 20% por su actualización anual. Además, ocupa alrededor de 20 GB en el disco duro, no simplifica automáticamente los tubos como vigas (puedes introducir manualmente los parámetros de cada viga a partir de un modelo alámbrico) y la preparación del modelo para su simulación es larga y pesada, siendo necesaria la realización de este paso cada vez que se actualiza el modelo. Es un gran software, pero no se disponía del presupuesto ni de la capacidad operativa que permite su funcionamiento en condiciones confortables, sin tener que estar preocupado sobre su colapso.

SolidWorks, debido a la naturalidad de este proyecto, ofrecía unas ventajas que no podían pasarse por alto. Como programa de diseño CAD, su facilidad de uso, la capacidad de sus herramientas y la rapidez con la que el programa realiza las operaciones son indiscutibles. Aunque pueda resultar sorprendente, lo más interesante de este programa llega en el momento de simular el modelo para asegurar su integridad estructural. Solidworks tiene integrado un asesor de simulaciones que sirve guía a lo largo del proceso y evita así errores habituales como no fijar algunos puntos en la geometría para realizar el análisis, tener dos tubos en un mismo punto del espacio (interferencias entre tubos) o realizar un mallado innecesariamente denso o excesivamente espaciado. Aproxima los tubos del modelo como vigas, aplicado las propiedades necesarias y empleando el alámbrico del modelo para crear los cortes que ejercen de mallado. Esta simplificación automática, permite realizar el mallado y la ejecución del estudio en apenas cinco o seis minutos (existe una función que

crea la malla y realiza los cálculos de forma conjunta, sin necesidad de hacer cada uno por separado). Debido a que este proyecto se ha realizado conjuntamente, el hecho de que las simulaciones queden guardadas en una pestaña del modelo, permite que todas las partes implicadas puedan revisar los cálculos sin necesidad de usar otro software, reduciendo así los costes de desarrollo debido al precio más económico de su licencia.

Por estas razones, se tomó la decisión de emplear únicamente SolidWorks, ya que cumplía de forma satisfactoria todas las necesidades a un precio razonable y sin complicaciones añadidas.

## 3. INTRODUCCIÓN

### 3.1. Objetivos del proyecto

Durante los últimos años, cada vez más empresas de tecnología y del mundo de la automoción han introducido en sus planes de investigación el desarrollo de vehículos autónomos. Lo que empezó siendo visto como una locura desarrollada por el gigante tecnológico Google, suma cada vez a más compañías que ven en este tipo de vehículo beneficios muy jugosos en el futuro. A pesar de que los vehículos autónomos se han visto en películas futuristas y las ferias internacionales hablaban de que estarían disponibles décadas atrás, la verdad es que hasta hace relativamente poco no se disponía de la tecnología necesaria a un precio asequible que permitiera sacar al mercado un vehículo comercialmente competitivo.

El desarrollo de un vehículo eléctrico resultó ser muy interesante, tanto para aprender a llevar a cabo proyectos, como para tener un primer contacto con este sector. Si bien unos buenos estudios sirven para tener mayor conocimiento de un campo específico de conocimiento, pensar a la vez en las posibles salidas laborales que pueda deparar el mañana, es casi tan importante o incluso más que los estudios en sí. Con este razonamiento previo, se puede concluir que los principales objetivos de este proyecto son los siguientes:

- **Aprendizaje autónomo:** La realización de un proyecto de estas características conlleva un proceso previo de recopilación de información, estudio de ésta y entendimiento de la materia. En este sentido, Internet ha sido una gran herramienta, ya que al ser un tema tan reciente se publican prácticamente a diario artículos, vídeos y más material en la red.
- **Capacidad de organización:** Si bien esta memoria se ha centrado en el chasis, con algunas imágenes que se pueden encontrar al final sobre el proceso de construcción y el resultado final, se ha tenido que llevar a cabo también la supervisión del resto del equipo. Tanto el sistema de frenado, como el diseño, como el proceso de construcción, ha requerido planificación con el fin de no obstaculizar la construcción del vehículo del Formula Student MAMI, construido en las mismas instalaciones que el vehículo eléctrico.
- **Demostrar el conocimiento adquirido a lo largo del grado:** A lo largo de cuatro cursos, los alumnos del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales adquieren conocimientos tanto teóricos como prácticos para poder enfrentarse a diferentes desafíos que les puedan ser planteados a lo largo de su carrera profesional. El TFG pone a prueba los conocimientos

y exige al estudiante emplear los recursos correctos de todo el abanico disponible de posibilidades.

- **Adquirir conocimiento en el campo de la automoción:** La realización del proyecto en una universidad que participa activamente en competiciones de automoción, favorece el hecho de que se hayan adquirido conocimientos en este campo, no sólo sobre tecnología de alto rendimiento utilizada en los eventos deportivos, sino también sobre la utilizada en pequeños vehículos utilitarios similares al desarrollado.

### 3.2. Alcance del proyecto

Al empezar el proyecto, se consideró que un buen objetivo en cuanto al alcance, era sentar las bases para que más adelante, mediante más intercambios, otros alumnos de la ETSEIB pudieran mejorar este vehículo a medida que la tecnología relacionada se fuera desarrollando. A mediados de marzo, debido a los problemas que presentaba un proyecto similar que estaba desarrollando un grupo de estudiantes de segundo año, MAMI ofreció la opción de construir el prototipo que se estaba desarrollando por los autores de esta memoria, nombrándolos líderes del proyecto.

Llegado este momento, se aceptó la oferta y se comenzó a trabajar no sólo en el bastidor y el sistema de suspensión como partes aisladas, sino como elementos dentro de un coche que debía ser funcional en conjunto con los demás elementos que integran un vehículo. El resultado final, del que se muestran imágenes a lo largo de este documento, fue más que satisfactorio.

Este cambio en los acontecimientos del proyecto forzó a una pivotación teniendo en cuenta que el vehículo debería resistir todos los test a los que fuera expuesto y no sólo a las cargas optimizadas después de todas las pruebas. Por ello, teniendo en cuenta que las cargas a las que sería sometido el prototipo podrían variar, se decidió dejar los valores del factor de seguridad de los componentes algo más elevados de lo que sería habitual. A pesar de ser conscientes de que ello penalizaría la ligereza del vehículo, al ser una estructura sobre la que se trabajará a lo largo de los siguientes años, no se podía arriesgar la integridad estructural ante posibles nuevos componentes o cargas que se pudieran aplicar más adelante.

## 4. EVALUACIÓN PREVIA DEL PROYECTO

A la hora de realizar un proyecto y más aún cuando se pretende que éste supere la fase teórica y llegue a construirse, se debe evaluar su viabilidad para evitar que problemas futuros supongan un fracaso. Está claro que siempre pueden surgir problemas inesperados, pero invertir tiempo en pensar en el proyecto de forma global permite minimizar los problemas y por ende, minimizar los costes. Por ello, se creyó conveniente realizar los análisis que se muestran a continuación.

### 4.1. Análisis de alcance (SWOT)

El análisis SWOT (DAFO por sus siglas en castellano) es un análisis que plasma de forma sencilla y muy visual los puntos fuertes y débiles de un proyecto, realizando un análisis externo y un análisis interno del mismo.

Para empezar, se realiza un análisis enfocado internamente para conocer los puntos fuertes y las debilidades del proyecto, así como un análisis enfocado de forma externa para conocer las oportunidades y las amenazas que se encontrarán.

- **Análisis interno:** Permite conocer los factores que se encuentran dentro del dominio del propio proyecto. Trata de conocer las limitaciones que tendrá durante su desarrollo, así como las facilidades que propiciarán un correcto trabajo. Para ello se hace la siguiente clasificación:

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>Fortalezas (Strengths)</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Menos contaminante que los vehículos de combustión.</li><li>• Menor coste operacional.</li><li>• Menor coste de mantenimiento.</li><li>• Ligereza del prototipo.</li><li>• Proyecto dotado de gran capacidad económica.</li><li>• Dos modos de conducción.</li></ul> |
|-------------------------------|--|

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Debilidades (Weaknesses)</b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado tiempo de recarga.</li> <li>• Tecnología aún en desarrollo.</li> <li>• Menores prestaciones que un vehículo de combustión.</li> </ul> |
|--|--|

- **Análisis externo:** Presenta los factores exteriores que pueden afectar al proyecto y sobre los cuales los desarrolladores del mismo no tienen control, ya sean positivos (oportunidades) o negativos (amenazas). Teniendo en cuenta las oportunidades y amenazas, se puede trabajar para intentar potenciar el desarrollo del proyecto con las primeras y para evitar la afectación de las segundas.

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Oportunidades (Opportunities)</b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Apertura de un nuevo mercado.</li> <li>• Población concienciada con el medio ambiente.</li> <li>• Producto sin competencia real en el mercado.</li> <li>• Ayudas gubernamentales.</li> <li>• Mejora continua de la tecnología.</li> </ul> |
| <p><b>Amenazas (Threats)</b></p>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Escepticismo de los posibles clientes.</li> <li>• Fluctuación del valor del rublo.</li> <li>• Precio elevado en el mercado.</li> <li>• Mejora continua de la tecnología.</li> </ul>   |

**Comentario:** Se considera la mejora continua de la tecnología como oportunidad y amenaza al mismo tiempo. Se debe a que esta mejora continua puede mejorar el producto tanto como dejarlo obsoleto en caso de que éste no se adapte a los nuevos tiempos.



## 4.2. Análisis comercial (Competencia, mercado...)

En el caso de que se decida sacar provecho económico del trabajo realizado, un análisis comercial que permita conocer a la competencia y evaluar el posible hueco que pueda hacerse un producto en el mercado no es sólo necesario, sino prácticamente obligatorio. ¿Quién será la competencia? ¿Quién será un comprador potencial? ¿Hacia qué sector de la población debo enfocar las campañas de publicidad? Todas estas preguntas deben estar resueltas desde las primeras fases del proyecto, ya que en función de las respuestas se deberán tomar decisiones en un sentido u otro.

### 4.2.1. Estudio de mercado

El mercado de los vehículos eléctricos es muy reciente. A pesar de que a principios del siglo XX se podían encontrar varios vehículos eléctricos en el mercado, los vehículos de combustión interna se impusieron antes de llegar a la década de los años treinta. Ahora, ochenta años después, parece que los vehículos eléctricos se abren un hueco en el mercado gracias a las necesidades de la sociedad actual y también (sería un error negarlo) a las ayudas del gobierno, que van desde un descuento en el precio final del vehículo, a exención de impuestos y facilidades (como aparcamiento gratuito) que no se ofrecen a los vehículos de combustión.

El mercado de los vehículos autónomos, debido a ser una tecnología en fase experimental y a la falta de una regulación legal que los convierta en coches de pleno uso, aún no dispone de oferta y por tanto el “mercado de los vehículos eléctricos autónomos” no puede considerarse como tal. Por ello, los vehículos analizados en esta sección corresponden a vehículos actuales no autónomos.

**Como vehículo de carga o trabajo:** Como vehículo de carga, se podría enfrentar en el mercado a pequeños vehículos que han encontrado su razón de ser en transportes breves dentro de un mismo barrio. Como especificaciones comunes, tienen el hecho de ser eléctricos y tener una capacidad de carga que, aunque limitada, es suficiente para suplir un par de envíos a domicilio en cada viaje, con la ventaja de ser un vehículo ágil que se puede aparcar en prácticamente cualquier lugar sin molestar a los demás conductores y con un consumo ínfimo.



Figura 1. GEM eM 1400LSV

- **GEM eM 1400 LSV:** Con una capacidad de carga de 570kg, este vehículo se presenta como una gran opción a la hora de considerar incluir pequeños vehículos de carga en la flota de una compañía. Su precio, aunque ronda los 12000€, se justifica con sus prácticamente 70km de autonomía en estado de carga máxima a una velocidad de circulación de 40km/h.



Figura 2. Alke ATX210E

- **Alke' ATX210E:** En esta versión básica, la empresa Alke ofrece un vehículo con gran espacio para sus ocupantes y comodidades como cabina cerrada y parabrisas, así como una capacidad de carga de 635kg ampliable a 1100kg en las versiones más caras. No se ha tenido referencia del precio de este vehículo.

**Como vehículo utilitario:** Como vehículo para su uso diario, el prototipo competiría no únicamente con los pequeños utilitarios ya disponibles en el mercado, tanto eléctricos, como de combustión, sino debido a su capacidad de solo un pasajero, también con motocicletas.



*Figura 3. Smart Fortwo Electric Drive*

- **Smart Fortwo Electric Drive:** Por su tamaño compacto y la agilidad que presenta, este modelo accede hasta en los callejones más estrechos; es por ello que se considera un posible competidor directo. Como puntos fuertes, cabe destacar la capacidad para dos pasajeros, la multitud de accesorios que presenta en sus diferentes versiones, así como su velocidad de hasta 125 km/h y sus 150 kilómetros de autonomía. Su punto más negativo es el precio, ya que el precio de serie se sitúa entre los 11932€ y los 15982€, dependiendo de si se alquila la batería pagando una cuota mensual o se adquiere en propiedad.



*Figura 4. Renault Twizy Urban 45*

- **Renault Twizy Urban 45:** Posiblemente el vehículo disponible en el mercado que más se asemeja al prototipo. No sólo en su tamaño, sino también en su similitud con las prestaciones del vehículo diseñado. Como puntos a destacar, su precio de 4917€ (sumando 50€ al mes por el alquiler de las baterías) en su versión más básica. Como inconveniente, es un vehículo extremadamente básico para el gusto de algunos, al no tener ventanas, calefactor o tener bloqueada la inclinación del respaldo.

#### 4.2.2. Target comercial

Cuando se habla de target comercial, se hace referencia a quién irá enfocado el desarrollo del vehículo, a qué perfil de comprador irá dirigido el producto. Para ello, se suele emplear el uso de personajes ficticios que suelen ser representativos de un gran sector de la sociedad. Para la realización de este estudio, se han considerado los siguientes personajes, separables en aquellos que piensan en el prototipo como una herramienta de trabajo o en aquellos que lo emplearán como utilitario.

##### **Posibles clientes que emplearán el prototipo como herramienta de trabajo:**



**Francisco:** Francisco regenta una pequeña frutería desde hace años en el barrio de Sarrià. Debido al envejecimiento de la población, que encarga sus frutas y verduras a cadenas de supermercado con servicio a domicilio, ha perdido clientes. Hace años que consideró ofrecer él también este servicio, pero no encontró ningún vehículo que pudiera satisfacer sus necesidades. A Francisco le interesa este vehículo autónomo por las siguientes razones:

- Podrá repasar las entregas que vendrán a continuación, ya que no deberá estar pendiente de la carretera.
- El bajo coste de transporte le permitirá ofrecer un servicio de calidad sin tener que encarecer los precios de sus productos.
- El pequeño tamaño del prototipo le permitirá estacionarlo sin molestar a los demás conductores. En caso de que no sea posible, podrá dejar que el coche por sí solo dé la vuelta a la manzana mientras él realiza el reparto.



**Nicolás:** Nicolás trabaja en un gran parque de atracciones. Más grande aún que Port Aventura. Es el encargado de organizar el uso que se le da a los vehículos de la compañía. Para optimizar costes, intenta buscar una solución al hecho de que un vehículo esté parado durante horas al lado de un trabajador que está realizando una labor de mantenimiento. Por ello, ha decidido sustituir la flota de camiones que tiene a su disposición. Nicolás se fijará en este vehículo por las siguientes razones:

- Tendrá suficiente espacio de carga como para llevar el reabastecimiento o las cajas de herramientas.
- Si un trabajador le comunica que la reparación le llevará un buen rato, podrá ordenarle al vehículo que vuelva al garaje para que puedan dar uso de él otros trabajadores.
- Al tener que circular por los mismos caminos por los que caminarán los clientes del parque, se evitará que éstos respiren gases contaminantes, aumentando así la calificación ecológica del complejo.

#### **Posibles clientes que emplearán el prototipo como utilitario:**



**María:** María tiene un hijo de 16 años al que lleva cada mañana al colegio. Vive en un piso en la zona de Vallvidrera. Éste le pide constantemente una moto para ir al colegio él solo. María trabaja en el departamento de estadística de la Dirección General de Tráfico y sabe que de los 40 fallecidos que hubo en la ciudad de Barcelona en accidentes de tráfico el pasado año, 19 iban en moto y 17 a pie, mientras que únicamente 3 se desplazaban en turismos. María quiere que su hijo sea más independiente, pero no quiere que tenga una moto y vivir preocupada. Podría considerar la compra de este prototipo por las siguientes razones:

- Es un vehículo que estará atento a su entorno y reforzará la seguridad de su hijo.
- Después de dejar a su hijo en el colegio, el prototipo podrá recogerla a ella para llevarla a trabajar.
- Le gusta ser una mujer cosmopolita, ecologista, moderna y cree que los productos que rodean a alguien le definen como persona.



**Steven Mahan:** En el año 2012, Google mostró al mundo en un corto spot de tres minutos como Steve, privado del 95% de su visibilidad, se volvía independiente por un día gracias al coche autónomo de la compañía. Durante una mañana, realizó tareas cotidianas como ir a la tintorería a recoger un traje o parar en un restaurante de comida rápida a por un tentempié. Steve es el único personaje real de esta lista, siendo representativo de un grupo que verá en los vehículos autónomos la posibilidad de recuperar parte de su antigua vida o descubrir una que nunca han

tenido. Todas aquellas personas dependientes como Steve Mahan, podrían adquirir el prototipo por las siguientes razones:

- Podrían volver a tener derecho a circular, aunque fuera con un carnet limitado que les permitiera conducir vehículos autónomos.
  - Dejarían de depender de terceras personas para aquellos trayectos que requieran un vehículo motorizado.
  - Recuperarían gran parte de su libertad individual, equiparándose así un poco más con aquellas personas que no padecen discapacidad alguna.
-

## 5. DISEÑO CONCEPTUAL DEL VEHÍCULO

A lo largo de este punto se explicarán diferentes aspectos fundamentales que son necesarios plantear antes de iniciar el diseño de cualquier vehículo. Se planteará el concepto de vehículo que se desea, las principales variables de diseño y también las restricciones presentes en el proyecto. Una vez definidos estos conceptos, el diseño del vehículo debe realizarse respetando estos parámetros. Mientras más detallado sea este apartado, menos dudas aparecerán en el diseño del vehículo.

### 5.1. Concepto de vehículo

El concepto de vehículo que se desea realizar es un prototipo de vehículo eléctrico que funcione autónomamente. Como se trata de un prototipo para experimentar con la tecnología de conducción autónoma se desea que sea monoplaza y de tamaño reducido. Este hecho facilitará la construcción, el diseño, la maniobrabilidad y reducirá los costes del proyecto.

En cuanto a la suspensión del coche, la trasera será de eje rígido y la delantera será suspensión de brazos independientes. En el apartado 7 se explicará más a fondo por qué se ha realizado esta elección.

El vehículo debe poder conducirse completamente a través de la electrónica presente en el coche, por lo que no sólo necesita un motor eléctrico para el avance del coche, sino que también necesita un motor eléctrico para hacer actuar la dirección y un actuador para activar los frenos.

### 5.2. Variables y restricciones de diseño

Es necesario plantear factores geométricos tales como la distancia entre ejes, ancho de vías y altura de la base del coche sobre el suelo. Estos factores influyen en la dinámica y maniobrabilidad del vehículo.

También se deben plantear las prestaciones deseadas para el prototipo, tales como: el peso total del vehículo, la velocidad máxima, el recorrido de la suspensión, el radio mínimo de giro, la autonomía del vehículo y el reparto de peso.

Algunas prestaciones como la potencia del motor principal así como la potencia del motor de la dirección ya estaban definidas. Como ya se comentó en el apartado 2.1 de esta memoria, el proyecto se inició a principios del curso académico 2015-2016 por estudiantes rusos de primer y segundo año de MAMI, los cuales ya adquirieron algunos componentes para el vehículo. Entre estos

componentes se encuentra el motor eléctrico del vehículo, el cual es solidario a un eje rígido con diferencial y con tambores de freno accionados mecánicamente, el motor de la dirección, las llantas y los neumáticos.

### 5.2.1. Distancia entre ejes o Batalla

La batalla se define como la distancia entre el eje delantero y el eje trasero del vehículo (ver figura 5). Esta distancia influye notablemente tanto en la estabilidad como en la agilidad del vehículo.

Si el vehículo cuenta con una batalla larga, éste será más estable pero menos ágil. Un vehículo con batalla pequeña es más ágil y maniobrable pero menos estable, sobre todo a velocidades elevadas.

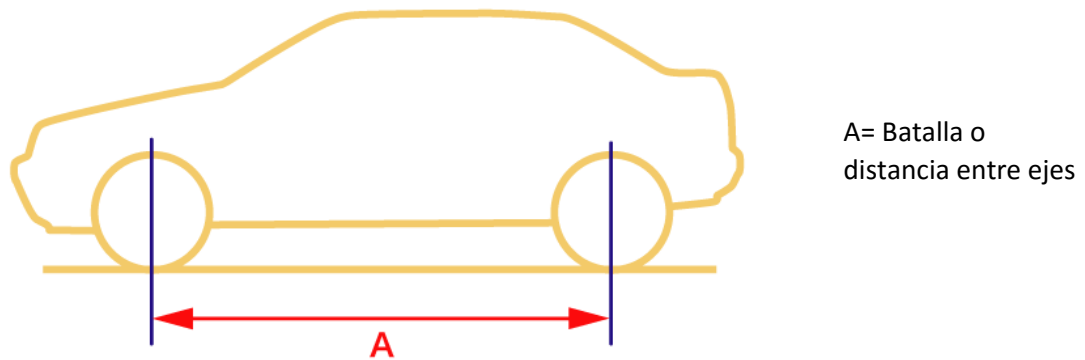


Figura 5. Distancia entre ejes

Para decidir la distancia entre ejes del prototipo se realizó un estudio de las batallas de vehículos similares que existen en el mercado (tabla 1).

Tabla 1. Distancia entre ejes de vehículos similares

| Modelo        | Distancia entre ejes (mm) |
|---------------|---------------------------|
| Smart Fortwo  | 1867                      |
| Renault Twizy | 1686                      |
| Toyota iQ     | 2000                      |

Para coches con asientos posteriores la distancia entre ejes supera los 2500mm.

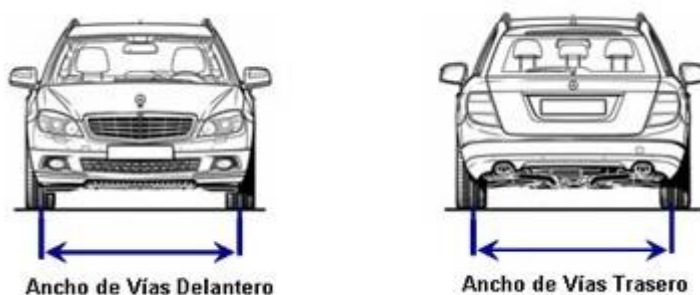
En base a este estudio se decidió utilizar una batalla de 1925mm. Esta cifra es ligeramente superior a la de los coches más similares como el Smart o el Renault debido a que se tuvo en cuenta el deseo



de tener un espacio en la parte trasera del coche reservado a la batería y los componentes electrónicos.

### 5.2.2. Ancho de vías

El ancho de vías se define como la distancia que separa las ruedas de un mismo eje, medida desde el centro del neumático en su punto de contacto con el suelo (ver figura 6). Cuanto más grande sea esta distancia, el vehículo tendrá más adherencia y estabilidad en el paso por curvas.



*Figura 6. Ancho de Vías*

En el caso del prototipo, el ancho de vías trasero ya estaba definido debido a que, tal y como se ha mencionado anteriormente, el motor eléctrico, el cual es solidario a un eje rígido con diferencial, ya estaba comprado. El ancho de vías trasero es de 1066mm.

Para que el coche no tenga problemas de estabilidad, la diferencia entre los anchos de vía delantero y trasero no debe ser superior al 10%. Debido a que se necesita espacio para alojar tanto el motor de la dirección como la cremallera de la dirección en la parte frontal, así como también los trapecios de la suspensión, se ha decidido utilizar un ancho de vías delantero un 5% más grande que el trasero, es decir de 1120mm (ver figura 7).

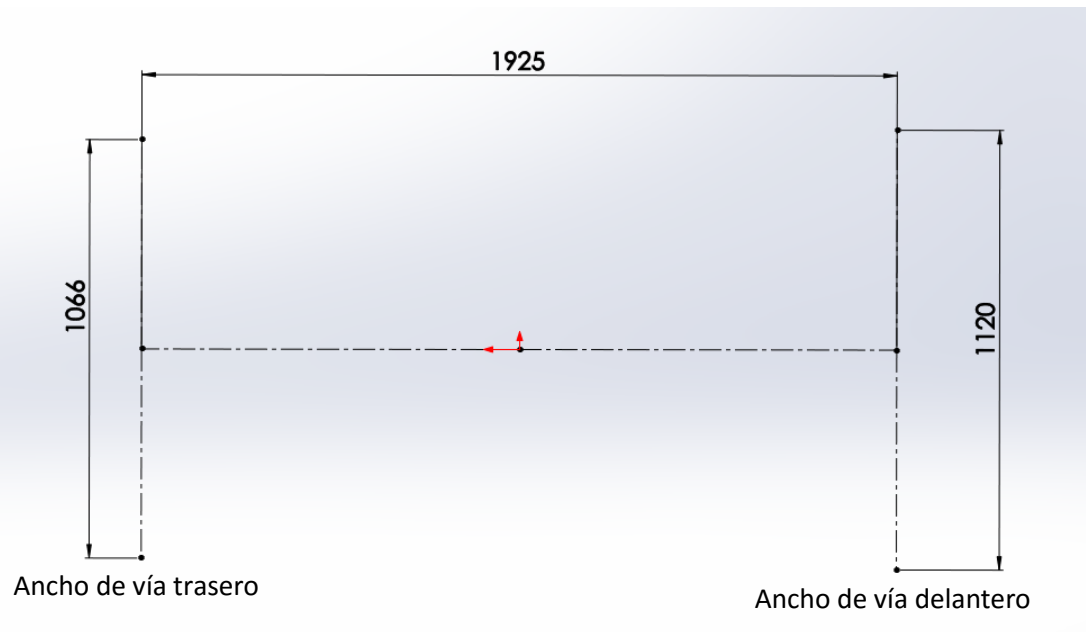


Figura 7. Anchos de vías y distancia entre ejes del prototipo

### 5.2.3. Altura de la base del coche sobre el suelo

Se define como la distancia vertical entre la parte inferior del bastidor y la zona de contacto con el suelo del neumático. Cuanto más grande sea esta distancia, más capacidad tendrá el vehículo de pasar por irregularidades en el terreno; en contraposición, el vehículo tendrá menos estabilidad y más facilidad de volcar, ya que tendrá el centro de gravedad más elevado. Por ejemplo, un vehículo todo terreno tiene una altura desde la base del bastidor hasta el suelo de más de 25cm, ya que tiene que sobrepasar los obstáculos de una pista de montaña (badenes, rocas, desniveles en el terreno, etc.) sin que el obstáculo llegue a impactar en la base del coche. En cambio, un vehículo de competición para circuitos, suele tener una altura inferior a 10cm, ya que necesita tener una gran estabilidad en el paso por curva.

Para decidir la altura de la base del bastidor del vehículo autónomo al suelo se hizo un estudio sobre la altura que tienen los vehículos de características similares en el mercado (ver tabla 2).

Tabla 2. Altura sobre el suelo de coches similares

| Modelo                | Altura sobre el suelo (mm) |
|-----------------------|----------------------------|
| Hyunday i10           | 165                        |
| Volkswagen Polo       | 168                        |
| BMW series 1          | 157                        |
| Mercedes-Benz Clase A | 160                        |
| Toyota iQ             | 135                        |
| Renault Twizy         | 119                        |
| Smart Fortwo          | 132                        |

En base a este estudio se ha decidido que el coche tenga una altura sobre el suelo de 150 mm, ya que se desea poder probar la tecnología autónoma sobre terreno llano pero también sobre terrenos con pequeñas imperfecciones.

#### 5.2.4. Prestaciones especificadas para el vehículo

Para diseñar un prototipo que cumpla las necesidades requeridas es necesario definir previamente las especificaciones que se desean para el vehículo. Todo el proceso de diseño debe estar enfocado a que el vehículo real que se construya cumpla estas especificaciones.

Se resumirá dichas especificaciones en la tabla 3, la cual contiene las siguientes columnas:

- **Parámetro:** Descripción del parámetro/objetivo a especificar.
- **Valor deseado:** Valor o estado deseado, del parámetro en cuestión en el vehículo final.
- **Valor límite:** El prototipo final, en ningún caso, debe tener un valor peor que el valor límite para el parámetro en cuestión.
- **Justificación:** Breve justificación de los parámetros escogidos.

Tabla 3. Prestaciones especificadas para el prototipo

| Parámetro  | Valor deseado | Valor límite | Justificación  |
|--|---------------|--------------|--|
| <b>Peso con un pasajero (kg)</b>                             | 400           | 500          | Basándose en el estudio de mercado se ha considerado que 400kg es un buen valor para un coche de este tamaño. Un valor superior a 500kg resultaría en un coche muy pesado y poco ágil que impediría obtener las especificaciones de velocidad y autonomía. |
| <b>Velocidad máxima (km/h)</b>                               | 40            | 25           | No es necesario que el coche vaya a más de 40km/h. Es necesario que el coche alcance el valor límite para poder realizar las pruebas deseadas.   |
| <b>Recorrido de las ruedas (cm) (debido a la suspensión)</b> | 10            | 8            | Las ruedas del vehículo deben tener por lo menos un recorrido de 8cm para poder sortear posibles terrenos irregulares y que la conducción sea cómoda.  |
| <b>Radio mínimo de giro (m)</b>                              | 4             | 4,5          | Se desea que el coche pueda girar lo más rápido posible. Un valor superior a 4m de radio de giro resultaría en un coche poco maniobrable.  |
| <b>Autonomía (min)</b>                                       | 40            | 20           | Se ha considerado que un valor inferior de autonomía a 20 minutos no permitiría al vehículo realizar las pruebas necesarias para el estudio de la tecnología autónoma.   |
| <b>Reparto de peso (%delante/%detrás)</b>                    | 40/60         | 35/65        | Debido a que el vehículo tendrá el pesado eje trasero, el motor eléctrico y la batería en la parte trasera se considera un buen reparto 40/60. Un reparto peor que el valor límite haría el coche dinámicamente difícil de conducir.                       |

## 6. BASTIDOR

El bastidor es la estructura principal del coche. Mediante tubos metálicos se arma una estructura que sería análogamente el esqueleto del vehículo. Esta estructura deberá soportar todos y cada uno de los componentes del vehículo, aportando un soporte rígido sobre el cual montar el resto del vehículo. Invertir horas en el diseño y optimización del bastidor vale la pena, ya que dependiendo de sus especificaciones finales, podrá ser más ligero y consumir menos, ser más robusto y menos sensible a las fuerzas externas, más sencillo de introducir en una cadena de montaje o cualquier otra cualidad que abarate los costes de producción.

### 6.1. Factores a tener en cuenta

Una de las partes más interesantes del diseño del bastidor de este vehículo, reside en las limitaciones de material que fueron impuestas desde el principio, así como las condiciones que debía cumplir el vehículo. A continuación se explican todas ellas:

- **Limitaciones en el diseño conceptual del vehículo:** Estas limitaciones se encuentran detalladas en el apartado anterior e influyen en el diseño del vehículo al limitar su tamaño, su carga máxima, su peso máximo...
- **Limitaciones en los perfiles:** Debido a la necesidad de usar unos perfiles específicos a fin de comprar el material al por mayor haciendo una cesta de compra común con otros proyectos, se realizó el diseño del vehículo empleando sólo tres tipos de perfil (todas ellas de acero):

1. **Perfil cuadrado 40x40x2 (mm):** Empleado en la construcción de la base del bastidor a fin de aportar la mayor rigidez y evitar la torsión de la estructura. Esta base soporta además el peso de todo el vehículo y se encarga de transferir este peso a las cuatro ruedas del vehículo.

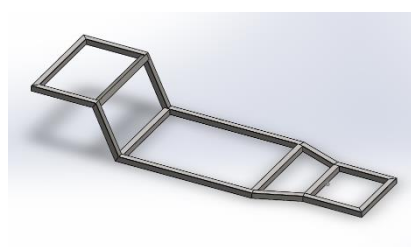


Figura 8. Usos del perfil cuadrado 40x40x2

2. **Perfil cuadrado 20x20x2 (mm):** Empleado como soporte en todos los casos a fin de disponer de una estructura sobre la que fijar algunos componentes (el pedal del acelerador o las guías del asiento, por



Figura 9. Usos del perfil cuadrado 20x20x2

ejemplo) sin aumentar de forma considerable el peso del bastidor.

3. **Perfil tubería 30x2 (mm):** Empleado para el cuerpo del vehículo. Es un perfil con el cual era relativamente sencillo trabajar con las herramientas y la maquinaria de la que se disponía. Además, su única función es asegurar la integridad estructural (además de aguantar su propio peso), por lo que no era necesario tubos con mayor rigidez y peso.

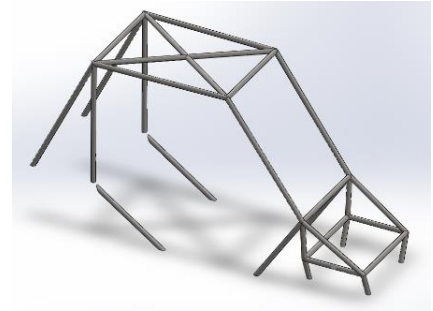


Figura 10. Usos del perfil tubular 30x2

- **Vehículo usado para testear tecnología:** Esta fue una de las razones por las que se optó por la bandeja trasera y por el elevado coeficiente de seguridad. Si bien, en caso de estar diseñando un vehículo para producir, se hubiera enfocado más el proyecto hacia la optimización; proveer a los encargados de la parte de electrónica de una bandeja trasera donde colocar los componentes electrónicos se consideró como un detalle importante. El hecho de usar esta bandeja, distorsiona el reparto de pesos de forma negativa, detalle que se corregiría en el modelo definitivo desplazando (por ejemplo) la batería a la parte frontal, justo encima de la parte izquierda de la cremallera de dirección. Además, no saber con toda seguridad los componentes definitivos de la parte electrónica, ni las condiciones del pavimento en el que se va a testear, obliga a un coeficiente de seguridad extremadamente conservador.
- **Vehículo ensamblado manualmente:** Se supo desde el primer momento en que la construcción fue asignada, que esta sería hecha manualmente con la ayuda de herramientas y maquinaria mecánica, no asistida por máquinas programables. Si bien se ha intentado trabajar de la forma más precisa y detallista posible, siempre se suelen arrastrar pequeños errores de magnitud y éstos se van acumulando cuanto más largo y complejo es el montaje, pudiendo afectar de manera significativa las capacidades de resistencia del bastidor. Además, el proceso de construcción supuso una serie de modificaciones del bastidor conceptual para poder simplificar el montaje. Por ello, se optó por unos coeficientes de seguridad significativamente altos en el modelo conceptual, que volvieron a ser evaluados en la versión que fue construida finalmente, por si se hubiera dado el caso

en que las modificaciones afectaran negativamente a las propiedades mecánicas del bastidor.

## 6.2. Proceso de diseño y optimización

En este punto se tratan con detalle todas y cada una de las etapas que ha afrontado el proceso de diseño, desde los razonamientos que han acompañado al trazado del bastidor, hasta las modificaciones finales para aumentar la rigidez, disminuir el peso o facilitar su construcción.

### 6.2.1. Primeros diseños

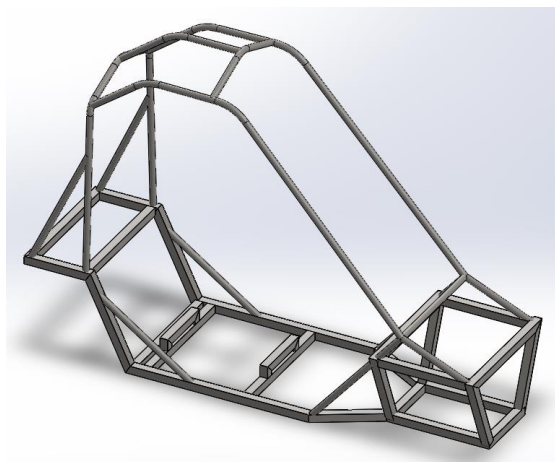


Figura 11. Primer bastidor diseñado

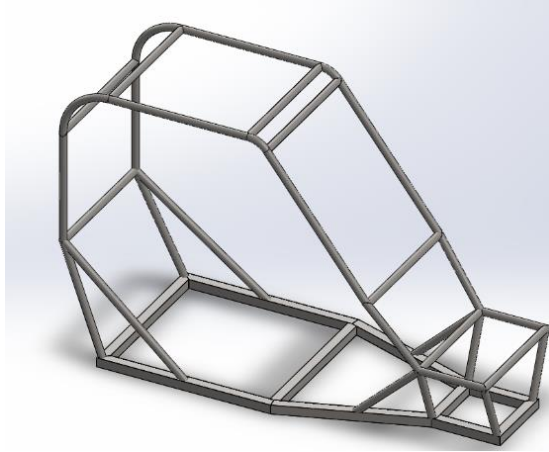
Para obtener inspiración para crear un bastidor desde cero, teniendo en cuenta las prestaciones y detalles que debía presentar el prototipo, se tomaron como referencia los vehículos conocidos como “baja”. Se trata de vehículos en la mayoría de casos unipersonales, con una estructura tubular que mantiene la rigidez estructural y protege al piloto de accidentes. Como hecho diferencial del prototipo respecto a este tipo de vehículos, podemos señalar que en el prototipo se

ha tenido en cuenta una ergonomía mucho más cómoda, así como un perfil lateral bajo para facilitar la entrada y la salida del pasajero en el vehículo. En un primer análisis realizado a vista en este primer modelo (figura 11), fue visto con claridad que las formas que presentaba el techo podrían suponer un quebradero de cabeza a la hora de realizar la construcción. Presentaba, también, uniones complejas entre tubos de perfil cuadrado y tubos de perfil circular en la parte frontal del vehículo y se debía mejorar la ergonomía. Por ello se optó por realizar los siguientes cambios:

- Simplificar la parte superior del vehículo con formas más sencillas de curvar manualmente.
- Eliminar la bandeja trasera del vehículo al creer que era innecesaria.
- Simplificar la parte delantera mediante el uso de tubos cuadrados únicamente en la base y empleando los perfiles circulares para todos los tubos que formaran parte del cuerpo.
- Ampliar la zona interior del vehículo empleando como modelo de prueba un dummy modelado en Solidworks de 1,75 cm que corresponde al 95% percentil de la altura de la población europea.

Con estos cambios se espera marcar unas pautas que sirvan como referencia a seguir en el diseño del prototipo.

### 6.2.2. Aproximándose al resultado final



*Figura 12. Bastidor que minimiza la longitud*

Una vez realizadas las modificaciones mencionadas en el apartado 6.2.1, se llegó al segundo modelo (figura 12). Este modelo presenta una corrección de la ergonomía del vehículo, así como las simplificaciones que podían facilitar su proceso de construcción. Como inconveniente se puede encontrar el hecho de que al modificar la base para que no hubiera bandeja trasera no se reducía el tamaño del prototipo al estar ésta encima del eje trasero, pero sí se ponía en riesgo

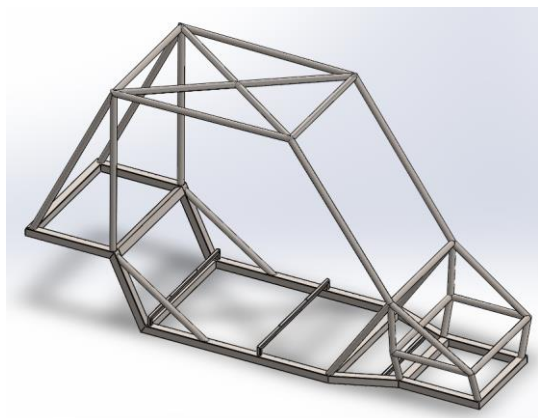
la integridad estructural del techo al no poder esta zona ser reforzada con dos tubos circulares que se fijaran a la bandeja trasera. También se supuso que la parte superior, al tener espacios muy grandes, podría presentar vibraciones y por tanto ruidos indeseados e incomodidad para los pasajeros. Por último, al ser informados de la indisposición de la máquina dobladora de tubos, se optó por hacer algunos cambios que permitieran su construcción. Se tomaron las siguientes decisiones al respecto:

- Volver a alargar la base para volver a disponer de la bandeja trasera, tanto para poder reforzar el techo, como para poder disponer de espacio de carga.
- Cambiar las curvas por ángulos entre tubos, al no disponer de dobladoras.
- Reforzar la parte superior mediante dos refuerzos desde la bandeja trasera.
- Hacer un refuerzo en X en el techo para darle rigidez estructural al cuerpo.
- Eliminar algunos tubos que empeoraban la visibilidad del pasajero.
- Introducir las guías del asiento como elementos estructurales del bastidor.

Con estos cambios se espera disponer de un modelo cercano al final que permita realizar las primeras simulaciones estructurales. Se espera también que el prototipo pueda empezar a ser construido cuanto antes, cerrando las diferentes indecisiones para poder dar por concluida la fase del diseño.



### 6.2.3. Primer bastidor válido



*Figura 13. Bastidor que se pretendía construir.*

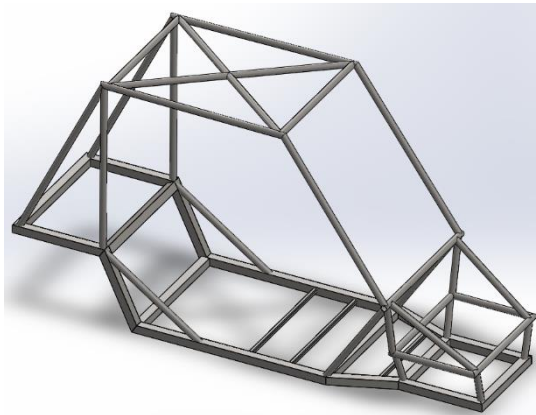
Una vez corregidas todas las deficiencias encontradas en los modelos anteriores (figura 11 Y figura 12) se diseñó el bastidor que se puede encontrar en este apartado (figura 13). Presenta todas las modificaciones que se creyeron necesarias a lo largo de las primeras etapas y tiene un aspecto bastante más estilizado que las versiones anteriores. Queda completamente definido el modelo y se realizan las primeras simulaciones que

comprueban la resistencia del vehículo, que se pueden encontrar en el apartado 6.5. A pesar de los buenos resultados obtenidos teóricamente, una vez analizado el proceso de construcción se entiende que no será posible realizar algunas partes de forma precisa, por lo que se decide realizar los siguientes cambios:

- Se eliminan las conexiones de tres tubos en un mismo punto. Se aleja uno de los tres tubos coincidentes unos milímetros para evitar bordes con dos ángulos de incidencia, difíciles de fabricar a mano.
- Se modifican los tubos con dos cortes cuando estos cortes tienen planos perpendiculares a los planos de corte no coincidentes.
- Se decide prescindir de las sujeciones de las guías del asiento como elemento estructural.
- Se incluyen guías para que el aluminio pueda soportar el peso de una persona en caso de que se apoye todo el peso de esta en el centro de la plancha.

Con estos cambios se espera poder construir el bastidor del prototipo con la mayor brevedad posible para permitir que los estudiantes centrados en la parte electrónica tengan tiempo para realizar las pruebas necesarias para que el vehículo pueda ser completamente autónomo. Se intentan reducir también las consecuencias negativas que pudiera tener la falta de experiencia en el montaje. Minimizando estos errores se favorece también el uso óptimo de los recursos, al malgastar la menor cantidad de material posible.

#### 6.2.4. Bastidor optimizado para la construcción



*Figura 14. Bastidor finalmente construido.*

Modificando ligeramente algunos pequeños detalles y manteniendo la geometría que ya tenía elementos anclados en proceso de construcción, se llevó a cabo una simplificación del bastidor para poder simplificar el proceso de construcción, que era necesaria al no tener suficiente tiempo como para familiarizarse con las máquinas de las que podíamos disponer. El proceso de simulación valida los cambios y el proceso de construcción los avala al no encontrar ningún problema durante el

montaje debido a éstos. No se ve la necesidad de hacer mayores cambios y, por consiguiente, es el bastidor que se llevará a la producción.

#### 6.3. Explicación del proceso de simulación

El proceso de simulación sirve para comprobar si todo aquello diseñado en la parte teórica es válido para ser empleado en el mundo real. Antiguamente se realizaban ensayos a destrucción como método de comprobación, pero éstos solicitan una gran cantidad de dinero para ser realizados, ya que el objeto ensayado queda inservible después de su simulación. Por ello, con la capacidad de cálculo que tienen los ordenadores de hoy en día y la facilidad de corregir los defectos vistos en estas simulaciones, las simulaciones mediante software se han convertido en una forma de trabajar muy rentable para las compañías, a pesar de que estos softwares suelen tener licencias con precios elevados.

En este caso particular, se considera que los análisis mencionados a continuación son representativos de la resistencia a las tensiones que soportará el bastidor del vehículo:

1. **Bache delantero:** Se supone un caso hipotético en el que una de las ruedas frontales del coche pasa por encima de un obstáculo, cargando todo el peso que debería soportar teóricamente el eje delantero sobre una rueda. Se espera que el bastidor no se deforme, a fin de evitar que los componentes del vehículo se rompan o dejen de funcionar.
2. **Bache trasero:** Se supone un caso hipotético en el que una de las ruedas traseras del coche pasa por encima de un obstáculo evitado por las ruedas delanteras, cargando todo el peso

que debería soportar teóricamente el eje trasero sobre una rueda. Se espera que el bastidor no se deforme, a fin de evitar que los componentes del vehículo se rompan o dejen de funcionar.

3. **Impacto frontal:** Se supone un caso hipotético en el que el vehículo sufre un impacto perfectamente frontal a la velocidad máxima que teóricamente alcanzará el prototipo. Se evalúa un primer caso calculando la deceleración (que nos ayudará a calcular la fuerza de impacto) como si se impactara contra un objeto más o menos rígido (otro vehículo) y un segundo en el que la deceleración se calcula como si el impacto fuera contra un objeto más rígido (un muro, por ejemplo). Se espera que la deformación en ambos casos no deje atrapado al conductor.
4. **Situación de vuelco:** Se simula un caso hipotético en el que el coche se deja caer boca abajo desde una altura aproximada de un metro. Se espera que el vehículo no se aplaste con su propio peso. Es un indicativo de la resistencia del techo del vehículo.

Si en estos cinco casos se cumplieran las expectativas, se considerarían los análisis como satisfactorios y el modelo como validado. Para ello se mostrarán tres gráficos en cada simulación:

1. **Gráfico de tensiones axiales y de flexión:** Coloreado según la magnitud de la tensión en el punto concreto.
2. **Gráfico de desplazamientos:** Coloreado según la magnitud del desplazamiento y con la magnitud de deformación exagerada para que se aprecien los resultados.
3. **Gráfico de coeficiente de seguridad:** Coloreado según el valor de este coeficiente.

**NOTA:** En todos los gráficos, a pesar de estar hechos con una gran densidad de mallado, se han fusionado varios elementos en el momento de hacer la gráfica para poder diferenciar los diferentes colores.

Además, cada simulación tiene cuatro pasos que son comunes para todas las simulaciones:

1. **Indicar las sujeciones:** Sirve para tener un sistema de referencia sobre el cual ejercer las fuerzas. Si no hubieran puntos fijos no se podría realizar la simulación, ya que la fuerza que aplica el programa a la hora de realizar cálculos desplazaría el bastidor hasta el infinito (se hace la simulación en un espacio virtual sin fricción) en vez de someterlo a tensiones.

2. **Aplicar las cargas:** Una vez calculadas las fuerzas y momentos que actúan en el bastidor en el momento hipotético sobre el que se realiza la simulación, se aplican en los puntos en las que son necesarias.
3. **Mallado y resolución:** Se realiza el mallado del bastidor. Este puede ser más o menos denso. Una mayor densidad implica más precisión aunque más tiempo de cálculo. Un mallado más espaciado implica que aunque los cálculos no son precisos, el tiempo de cálculo será mucho menor. Una vez realizado el mallado se pueden realizar los cálculos que nos den los resultados de la simulación.

#### 6.4. Consideraciones de las simulaciones

En todas las simulaciones realizadas a ambos bastidores, tanto al primer bastidor válido, como al que finalmente se ha construido, se han tenido en cuenta los siguientes valores como referencias:

- La masa total del vehículo son 400kg con el piloto incluido. Esta es la masa máxima que podría llegar a tener nuestro vehículo con todos los componentes definitivos y en funcionamiento.
- Se considera un reparto de pesos sobre los ejes de 60/40. Esto implica que el 60% de la masa recaerá sobre el eje trasero y el 40% restante sobre el eje delantero.
- Se aplicarán relaciones trigonométricas para tener en cuenta el ángulo de incidencia de las fuerzas.
- Se considera la gravedad como  $9,81 \text{ m/s}^2$

#### 6.5. Simulaciones del primer bastidor válido

Las primeras simulaciones fueron realizadas con el bastidor que se muestra en el apartado 6.2.3. Los resultados de éstas se pueden ver a continuación, desglosados en cada uno de los cuatro análisis realizados.

##### 6.5.1. Simulación 1: Bache delantero

En la siguiente figura (figura 15), se indican en color rojo los puntos fijados para la simulación (lugares donde los amortiguadores actúan) y en verde el punto donde se aplican las fuerzas y los momentos.

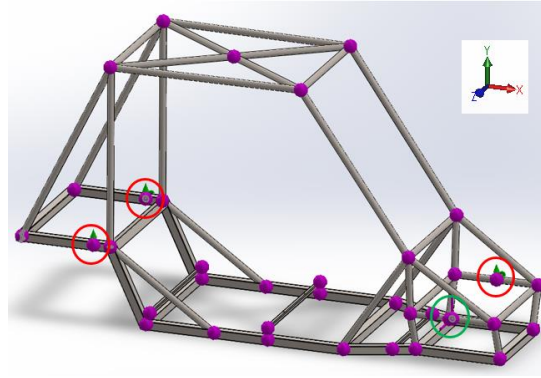


Figura 15. Condiciones de contorno aplicadas.

Para calcular condiciones de contorno, aplicadas en el punto redondeado en verde, se realizan los siguientes razonamientos:

- **Fuerzas actuantes:** Sobre este punto recaerán, por las razones comentadas en el apartado 6.3 y 6.4, las siguientes fuerzas:

$$F_z = -400 * 0,4 * 9,81 * \cos(70) = -536,835 \text{ N}$$

$$F_y = 400 * 0,4 * 9,81 * \sin(70) = 1474,942 \text{ N}$$

- **Momentos desde el eje de la barra donde se encuentra el punto verde:** Debido a que el amortiguador no incide directamente sobre una montura a 4cm de distancia.

$$M_x = -400 * 9,81 * 0,4 * 0,04 = -62,784 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- **Tensiones axiales y de tensión y coeficiente de seguridad:** Como se puede apreciar en la figura 16, las tensiones están distribuidas de forma bastante uniforme en todos los puntos de bastidor. El punto más crítico, que es el que está fijado en la parte delantera, resiste sobradamente la fuerza aplicada (FDS = 5,846 en la figura 17). Apreciamos también como los puntos de soldadura (que son los puntos con cambio de geometría) presentan tensiones más elevadas.

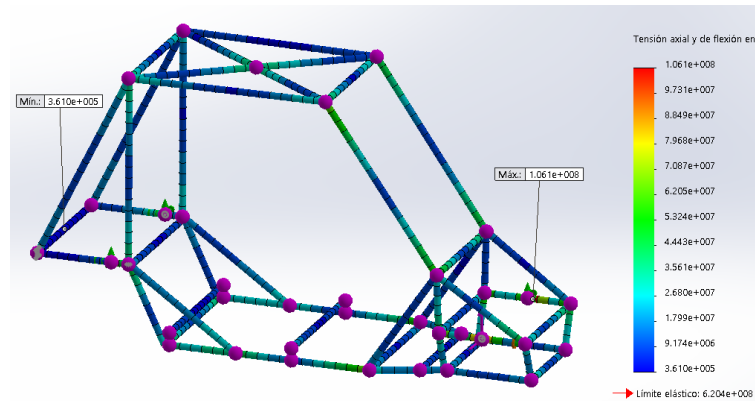


Figura 16. Tensiones axiales y de flexión.

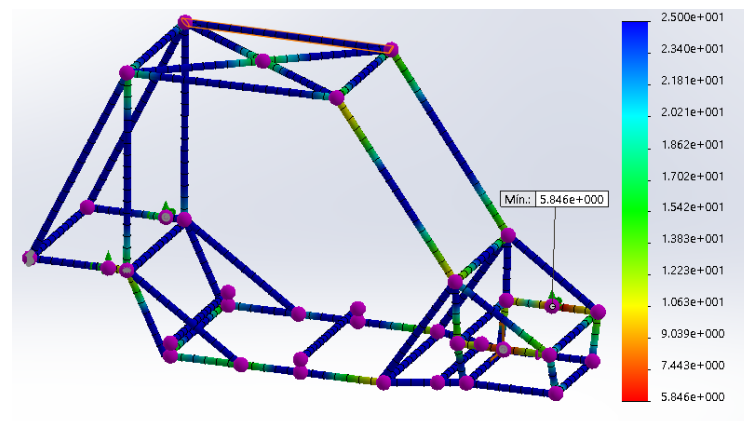


Figura 17. Factor de seguridad del bastidor.

**Deformaciones:** En la figura 18, se ha realizado la gráfica con una escala de deformación x58, para poder apreciar a simple vista qué puntos se deforman y en qué dirección. La deformación máxima es inferior a 4mm, por lo que se considera el resultado de esta simulación como satisfactorio.

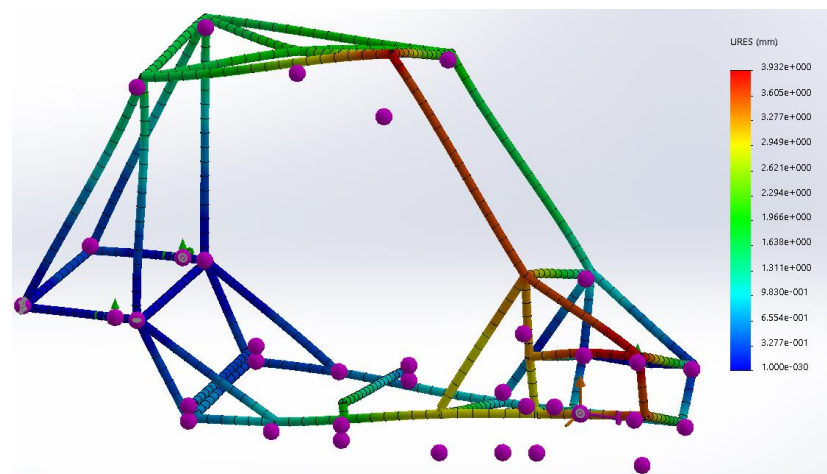


Figura 18. Gráfico de deformaciones.

### 6.5.2. Simulación 2: Bache trasero

En la siguiente figura (figura 19), se indican en color rojo los puntos fijados para la simulación (lugares donde los amortiguadores actúan) y en verde el punto donde se aplican las fuerzas y los momentos.

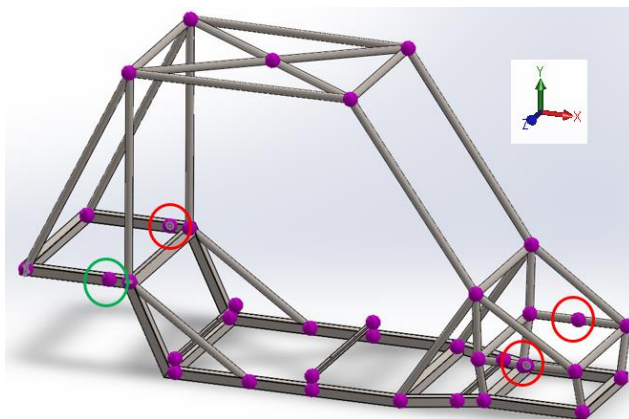


Figura 19. Condiciones de contorno aplicadas.

Para calcular condiciones de contorno, aplicadas en el punto redondeado en verde, se realizan los siguientes razonamientos:

- **Fuerzas actuantes:** Sobre este punto recaerán, por las razones comentadas en el apartado 6.3 y 6.4, las siguientes fuerzas:

$$F_y = 400 * 0,6 * 9,81 * \sin(81,75) = 2330,035 \text{ N}$$

$$F_x = 400 * 0,6 * 9,81 * \cos(81,75) = 337,839 \text{ N}$$

- **Tensiones axiales y de tensión y coeficiente de seguridad:** Como se puede apreciar en la figura 20, las tensiones están distribuidas de forma bastante uniforme en todos los puntos de bastidor. El punto más crítico, que es el que está fijado en la parte delantera, resiste sobradamente la fuerza aplicada (FDS = 4,139 en la figura 21). Apreciamos también como los puntos de soldadura presentan tensiones más elevadas.



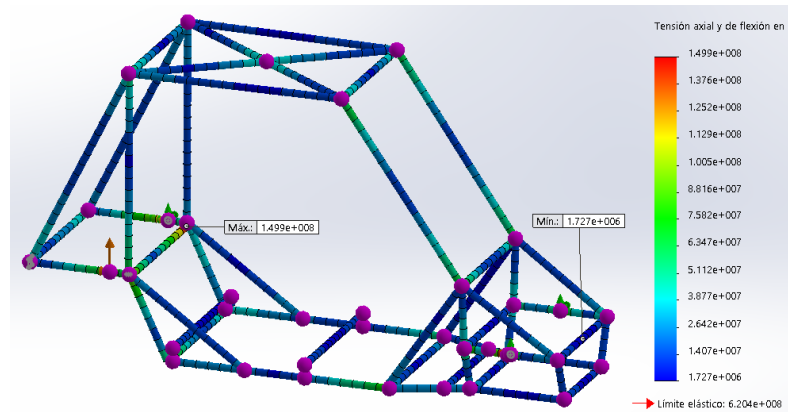


Figura 20. Tensiones axiales y de flexión.

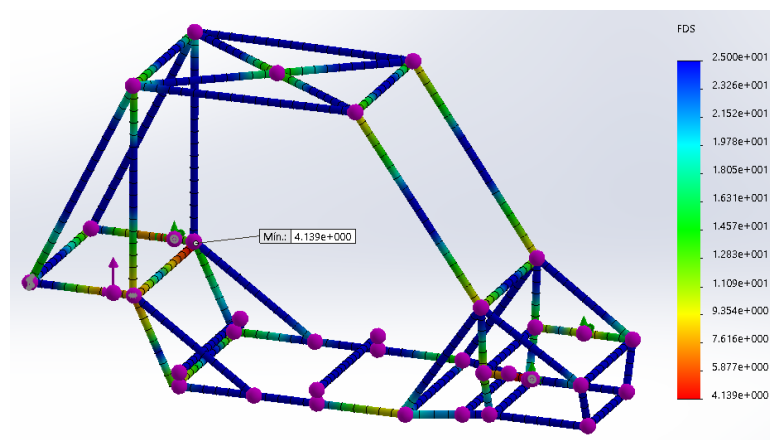


Figura 21. Factor de seguridad.

- **Deformaciones:** En la figura 22, se ha realizado una gráfica con una escala de deformación x58, para poder apreciar a simple vista qué puntos se deforman y en qué dirección. La deformación máxima es inferior a 8mm, por lo que se considera el resultado de esta simulación como satisfactorio.

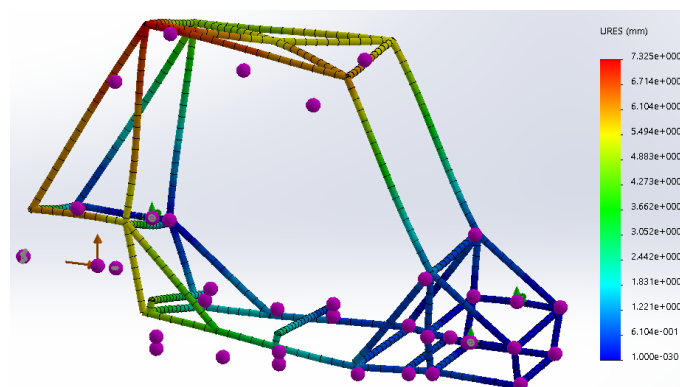


Figura 22. Gráfico de deformaciones.



### 6.5.3. Simulación 3: Impacto frontal

Para este caso, se calculará la deceleración (D) sufrida por el vehículo teniendo en cuenta dos tiempos de impacto. El primero, de 0,2 segundos, representará un impacto con un objeto semi-rígido mientras que el segundo, de 0,1 segundos, representará un impacto con un objeto completamente rígido. Suponemos que la velocidad del impacto es de 45km/h (12,5 m/s), que es la velocidad máxima que alcanza el vehículo. El objetivo es ver, con la gráfica de deformadas, si el pasajero quedaría atrapado en el interior del vehículo o si el bastidor podría causarle daños.

- **Cálculo de fuerzas actuantes:** Se calcula la fuerza en Gs (deceleración) que soportará el vehículo. Considerando la siguiente fórmula como la que cuantifica la deceleración, donde  $v_i$  es la velocidad inicial,  $v_f$  la velocidad final y  $t$  el tiempo:

$$D = \frac{\left(\frac{v_i - v_f}{t}\right)}{9,81} \quad (\text{Ec. 1})$$

Se calcula la deceleración en cada uno de los dos casos comentados:

$$D_1 = \frac{\left(\frac{12,5 - 0}{0,2}\right)}{9,81} = \frac{62,5}{9,81} = 6,371G$$

$$D_2 = \frac{\left(\frac{12,5 - 0}{0,1}\right)}{9,81} = \frac{125}{9,81} = 12,742G$$

Habiendo calculado las deceleraciones, podemos calcular la fuerza de impacto sobre el frontal del vehículo:

$$F_{1x} = -400 * 9,81 * 6,371 = -25000N$$

$$F_{2x} = -400 * 9,81 * 12,742 = -50000N$$

A continuación, se aplican las condiciones de contorno que se aprecian en la figura 23. Los puntos rojos son puntos de geometría fija, mientras que los puntos verdes son la zona de impacto, donde se reparte la fuerza que recibirá el vehículo en cuatro puntos.

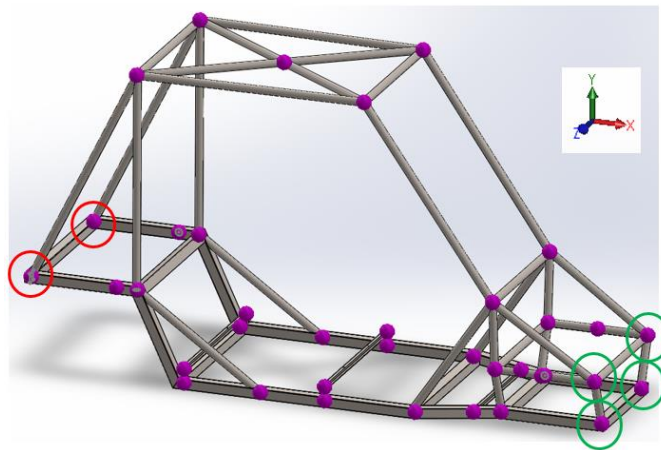


Figura 23. Condiciones de contorno aplicadas.

Como en este caso estamos interesados en que el piloto no quede atrapado, no se tienen en cuenta el gráfico de tensiones ni el de coeficientes de seguridad, ya que no se espera que se mantenga la integridad estructural del vehículo después del impacto. Como curiosidad, en ambos casos ha sido inferior a 1 (FDS=0,8 en la primera simulación; FDS=0,4 en la segunda). Como podemos ver en la figura 24, en la primera simulación ha habido desplazamientos de hasta 12 centímetros. En el caso de la figura 25, correspondiente a la simulación del impacto más agresivo, tampoco quedaría atrapado el pasajero, ya que las deformaciones de hasta 24,12 centímetros no son suficientes como para deformar suficientemente el habitáculo.

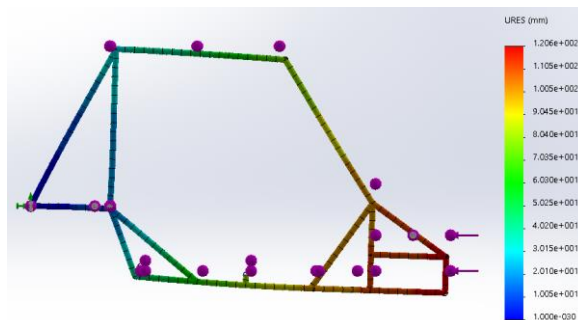


Figura 24. Deformación después del impacto "suave"

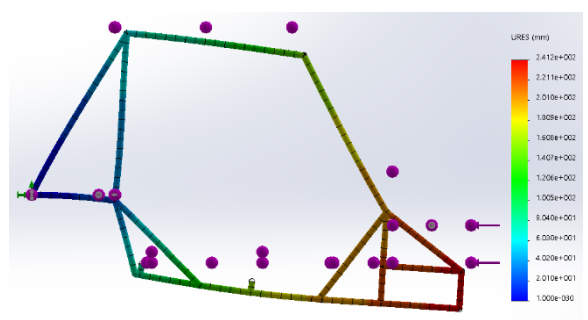


Figura 25. Deformación después del impacto "brusco"

#### 6.5.4. Simulación 4: Situación de vuelco

En este caso, se simula una caída desde dos metros de altura sobre el techo del vehículo. A continuación, se aplican las condiciones de contorno que se aprecian en la figura 26. Los puntos rojos son puntos de geometría fija, mientras que los puntos verdes son el lugar donde se aplica la fuerza calculada en cada caso, repartida en cuatro puntos de impacto en el techo. Como se puede intuir por las condiciones de contorno, se considera que es el habitáculo del prototipo el que deberá resistir la simulación.

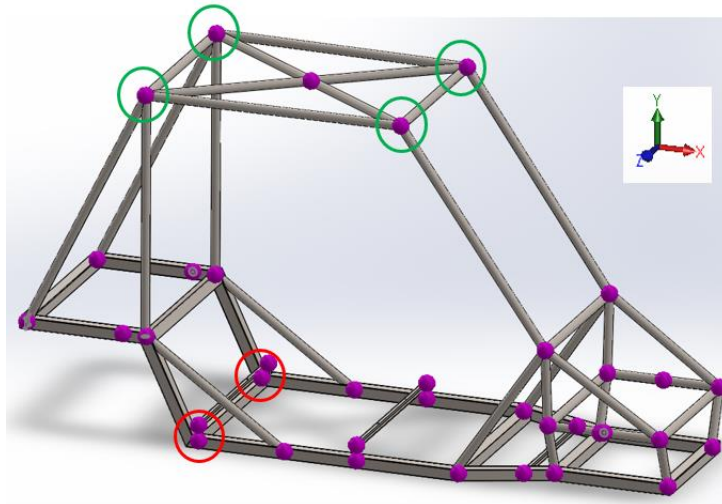


Figura 26. Condiciones de contorno aplicadas.

- **Cálculo de fuerzas actuantes:** Para calcular la velocidad con la que impactará contra el suelo, se realiza el cálculo siguiente (siendo  $d$  la distancia hasta el suelo):

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot d} = \sqrt{2 * 9,81 * 2} = 6,264 \text{ m/s}$$

Aplicando la fórmula de desaceleración (ec.1) empleada en el apartado 6.5.3, calculamos la fuerza con la que el techo del vehículo impactará contra el suelo:

$$D = \frac{\left(\frac{v_i - v_f}{t}\right)}{9,81} = \frac{\left(\frac{6,264 - 0}{0,1}\right)}{9,81} = 6,385G$$

Por lo que, aplicando el mismo procedimiento que en el apartado anterior, calculamos la fuerza de impacto:

$$F = 9,81 * 400 * 6,365 = 24976 \text{ N}$$

Como en este caso vuelve a ser importante que el piloto no quede atrapado dentro del vehículo ni sufra daños por culpa del bastidor, interesa que la deformación no sea suficientemente grande como para que esto ocurra. Por ello, se ha tenido en cuenta el gráfico de desplazamientos, donde el máximo desplazamiento ha sido de 10,38 centímetros. Aunque es un valor suficientemente grande como para afectar a los componentes que se encuentran en el vehículo y podría generar averías, no es lo suficiente significativo como para atrapar al pasajero o lesionarlo. En la figura 27, donde las deformaciones están a escala real, se pueden apreciar estas deformaciones.

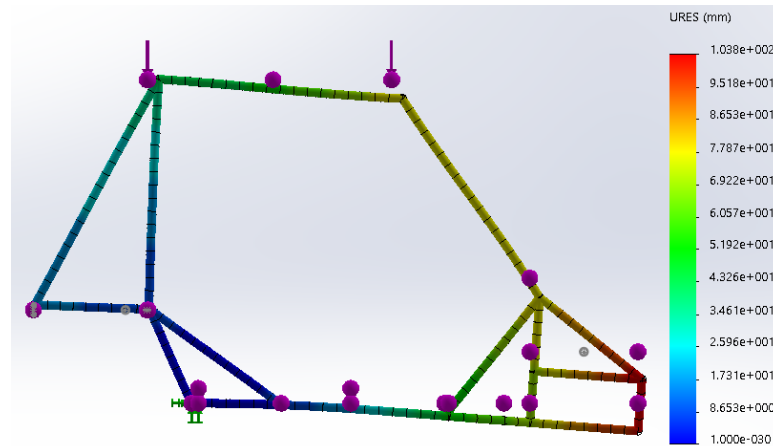


Figura 27. Deformaciones tras la simulación de vuelco.

#### 6.5.5. Valoración de las simulaciones

Puesto que todos los análisis realizados han concluido con buenos resultados, podemos validar la rigidez estructural del modelo y por tanto dar el visto bueno al diseño realizado. Desgraciadamente, la necesidad de simplificar el proceso de construcción implica que se deba volver a realizar esta validación una vez hechas las modificaciones en el bastidor.

### 6.6. Simulaciones del bastidor optimizado para la construcción

Como se ha comentado con anterioridad, las limitaciones del proceso de construcción forzaron un cambio en el diseño del bastidor. A pesar de la gran rigidez estructural del bastidor simulado en el apartado 6.5, el bastidor finalmente construido debía ser también simulado para evitar sorpresas desagradables. Para ello, se llevaron a cabo los mismos análisis que los realizados en el apartado 6.5, con las mismas consideraciones tomadas en cuenta.

Cuando se tuvo que modificar el bastidor, se decidió mantener en la medida de lo posible todas aquellas zonas cuya modificación obligara a modificar también otras partes o componentes del vehículo. Esto implica, por ejemplo, que los ángulos de incidencia de las fuerzas actuantes sobre el bastidor son los mismos.

También, puesto que el peso del vehículo empleado en las simulaciones es un valor orientativo máximo, se mantiene la masa supuesta del vehículo en 400 kilogramos.

### 6.6.1. Simulación 1: Bache delantero

En la figura 28 se pueden ver las condiciones de contorno que se van a aplicar en esta simulación. Los puntos rojos corresponden a puntos de geometría fija, mientras que los puntos verdes corresponden a puntos sobre los cuales se van a aplicar fuerzas.

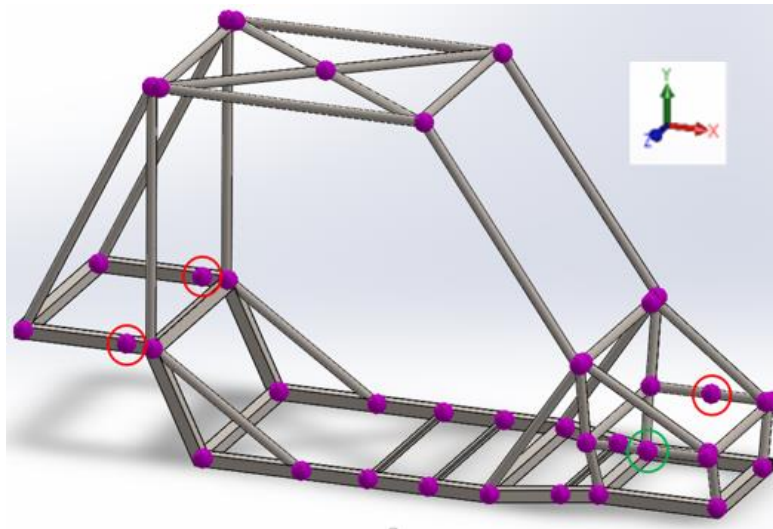


Figura 28. Condiciones de contorno aplicadas.

Para calcular condiciones de contorno, aplicadas en el punto redondeado en verde, se realizan los siguientes razonamientos, idénticos a los del apartado 6.5.1 debido a que el cambio de geometría no afectó a la posición de los amortiguadores:

- **Fuerzas en el punto verde:** Sobre este punto recaerán, por las razones comentadas en el apartado 6.3 y 6.4, las siguientes fuerzas:

$$F_z = -400 * 0,4 * 9,81 * \cos(70) = -536,835 \text{ N}$$

$$F_y = 400 * 0,4 * 9,81 * \sin(70) = 1474,942 \text{ N}$$

- **Momentos desde el eje de la barra donde se encuentra el punto verde:** Debido a que el amortiguador no incide directamente sobre el tubo, sino sobre una montura a 4cm de distancia.

$$M_x = -400 * 9,81 * 0,4 * 0,04 = -62,784 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- **Tensiones axiales y de tensión y coeficiente de seguridad:** Como se puede apreciar en la figura 29, las tensiones están distribuidas de forma bastante uniforme en todos los puntos del bastidor, salvo en las esquinas (lugares con cambio de geometría). El punto más crítico,

que es el que está fijado en la parte delantera, resiste sobradamente la fuerza aplicada (FDS = 7,366 en la figura 30). Apreciamos también como los puntos de soldadura (que además es donde se hacen esquinas) presentan tensiones más elevadas.

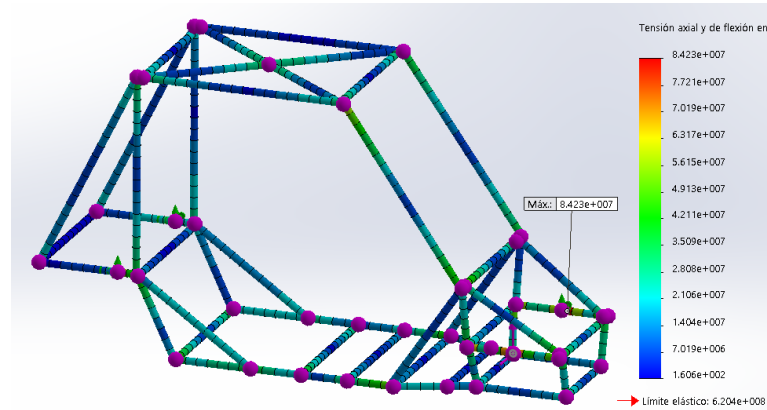


Figura 29. Tensiones axiales y de flexión.

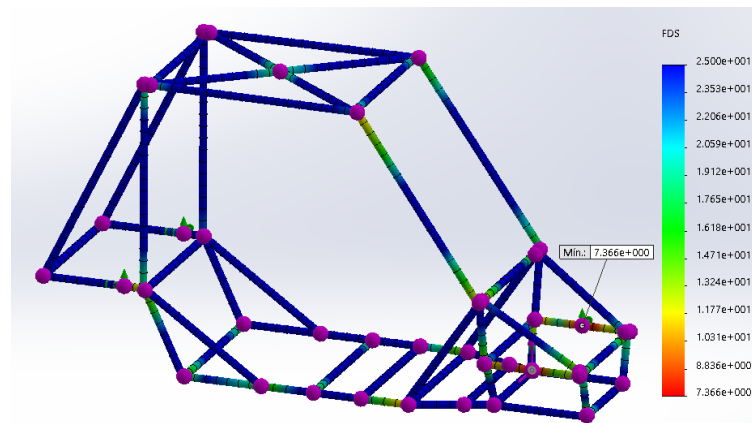


Figura 30. Factor de seguridad.

- **Deformaciones:** En figura 31, se ha realizado gráfica con una escala de deformación x62, para poder apreciar a simple vista qué puntos se deforman y en qué dirección. La deformación máxima es de 3,656 mm, por lo que se considera el resultado de esta simulación como satisfactorio al no ser suficiente este valor para dañar los componentes.

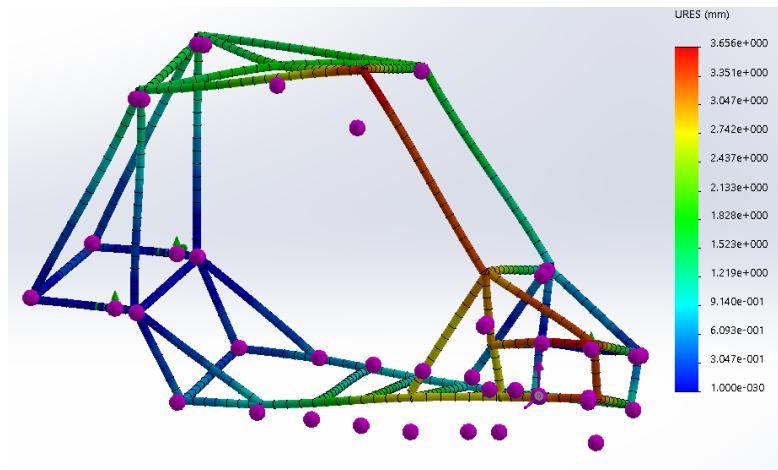


Figura 31. Gráfico de deformaciones.

### 6.6.2. Simulación 2: Bache trasero

En la siguiente figura (figura 32), se indican en color rojo los puntos fijados para la simulación (lugares donde los amortiguadores actúan) y en verde el punto donde se aplican las fuerzas y los momentos.

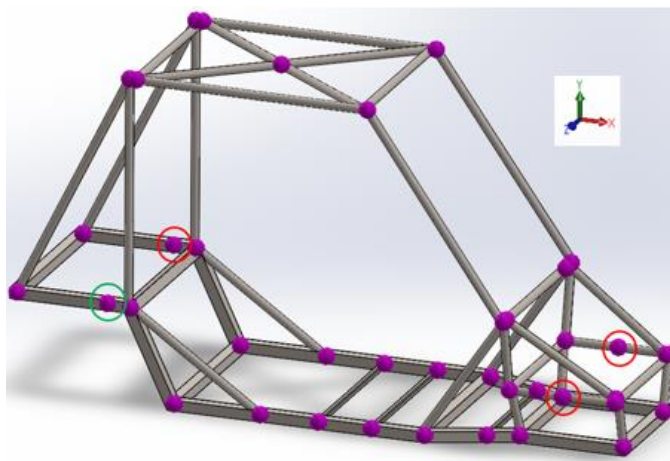


Figura 32. Condiciones de contorno aplicadas.

Para calcular condiciones de contorno, aplicadas en el punto redondeado en verde, se realizan los razonamientos del apartado 6.5.2, ya que la geometría de estos puntos se ha mantenido constante:

- **Fuerzas actuantes:** Sobre este punto recaerán, por las razones comentadas en el apartado 6.3 y 6.4, las siguientes fuerzas:

$$F_y = 400 * 0,6 * 9,81 * \sin(81,75) = 2330,035 \text{ N}$$

$$F_x = 400 * 0,6 * 9,81 * \cos(81,75) = 337,839 \text{ N}$$



- **Tensiones axiales y de tensión y coeficiente de seguridad:** Como se puede apreciar en la figura 33, las tensiones están distribuidas de forma bastante uniforme en todos los puntos de bastidor. El punto más crítico, que es el que está fijado en la parte delantera, resiste sobradamente la fuerza aplicada ( $FDS = 4,153$  en la figura 34). Se aprecia también como los puntos de soldadura presentan tensiones más elevadas, ya que son los puntos donde hay cambios de geometría.

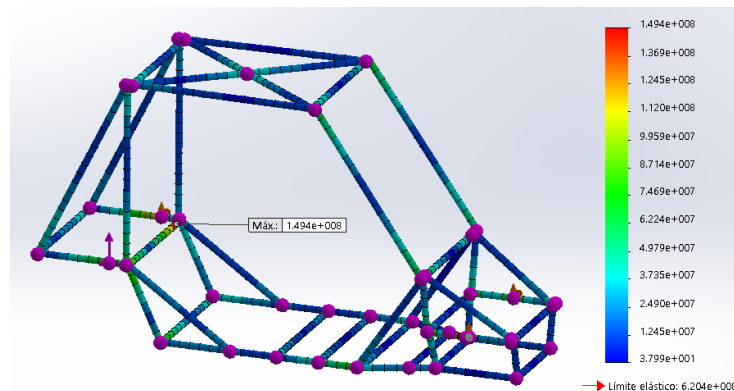


Figura 33. Tensiones axiales y de flexión.

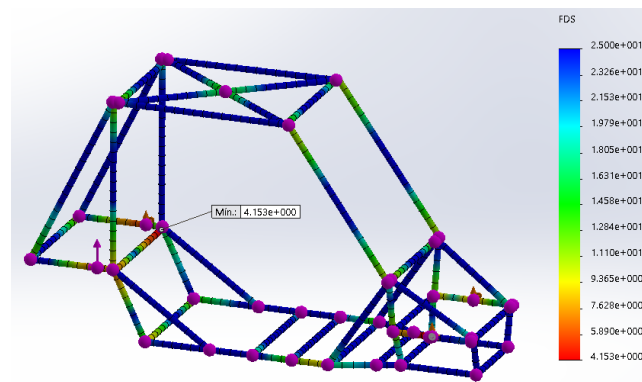


Figura 34. Factor de seguridad.

- **Deformaciones:** En la figura 35, se ha realizado gráfico con una escala de deformación x58, para poder apreciar a simple vista qué puntos se deforman y en qué dirección. La deformación máxima es de 7,16 milímetros, por lo que se considera el resultado de esta simulación como satisfactorio.



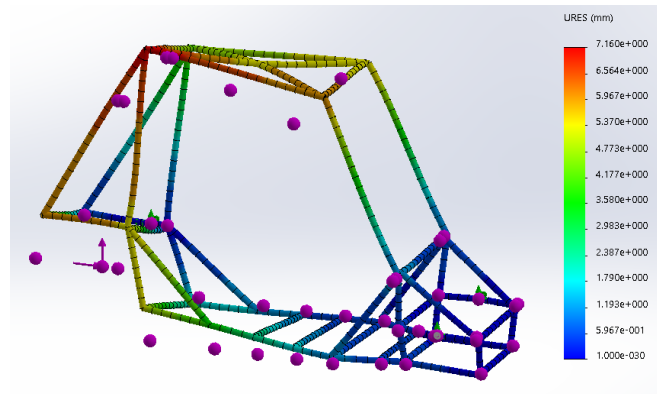


Figura 35. Gráfico de deformaciones.

### 6.6.3. Simulación 3: Impacto frontal

Para esta caso, se empleará la deceleración (D) sufrida por el vehículo teniendo en cuenta dos tiempos de impacto. El primero, de 0,2 segundos, representará un impacto con un objeto semi-rígido mientras que el segundo, de 0,1 segundos, representará un impacto con un objeto completamente rígido. Suponemos que la velocidad del impacto es de 45km/h (12,5 m/s), que es la velocidad máxima que alcanza el vehículo. El objetivo es ver, con la gráfica de deformadas, si el pasajero quedaría atrapado en el interior del vehículo o si el bastidor podría causarle daños.

- **Cálculo de fuerzas actuantes:** Se consideran las mismas que las empleadas en el apartado 6.5.3.

$$F_{1x} = -400 * 9,81 * 6,371 = -25000N$$

$$F_{2x} = -400 * 9,81 * 12,742 = -50000N$$

A continuación, se aplican las condiciones de contorno que se aprecian en la figura 36. Los puntos rojos son puntos de geometría fija, mientras que los puntos verdes es la zona de impacto, donde se reparte la fuerza que recibirá el vehículo en cuatro puntos.

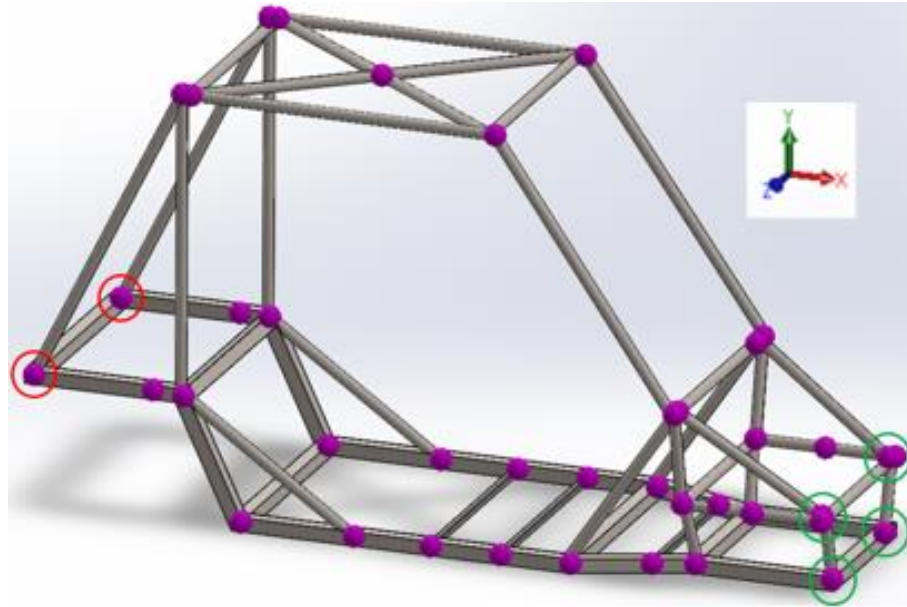


Figura 36. Condiciones de contorno aplicadas.

Como en este caso estamos interesados en que el piloto no quede atrapado, no se tienen en cuenta el gráfico de tensiones ni el de coeficientes de seguridad, ya que no se espera que se mantenga la integridad estructural del vehículo después del impacto. Como curiosidad, de la misma forma que en el caso del apartado 6.5.3 en ambos casos ha sido inferior a 1 (FDS=0,8 en la primera simulación; FDS=0,4 en la segunda), por lo que habría que prescindir del bastidor accidentado y emplear uno nuevo.

Como podemos ver en la figura 37, en la primera simulación ha habido desplazamientos de hasta 11,98 centímetros y el pasajero podrá salir del vehículo (salvo lesiones) por su propio pie. En el caso de la figura 38, correspondiente a la simulación del impacto más agresivo, tampoco quedaría atrapado el pasajero, ya que las deformaciones de hasta 23,95 centímetros no son suficientes como para deformar suficientemente el habitáculo.

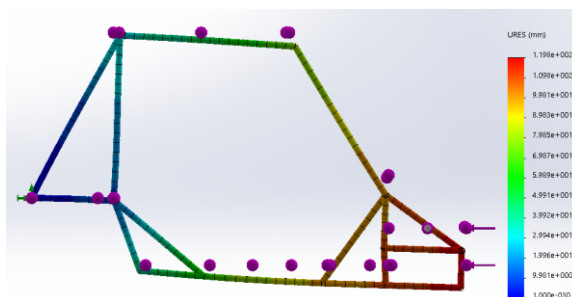


Figura 37. Deformación después del impacto "suave"

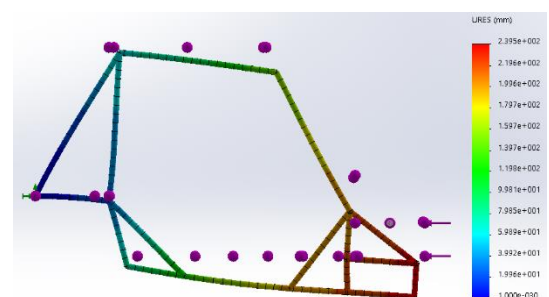


Figura 38. Deformación después del impacto "brusco"

#### 6.6.4. Simulación 4: Situación de vuelco

En este caso, se simula una caída desde dos metros de altura sobre el techo del vehículo. A continuación, se aplican las condiciones de contorno que se aprecian en la figura 39. Los puntos rojos son puntos de geometría fija, mientras que los puntos verdes son el lugar donde se aplica la fuerza calculada en cada caso, repartida en cuatro puntos de impacto en el techo. Como se puede intuir por las condiciones de contorno, se considera el habitáculo del vehículo que es el que deberá resistir la simulación, deformándose menos de lo suficiente para atrapar al piloto.

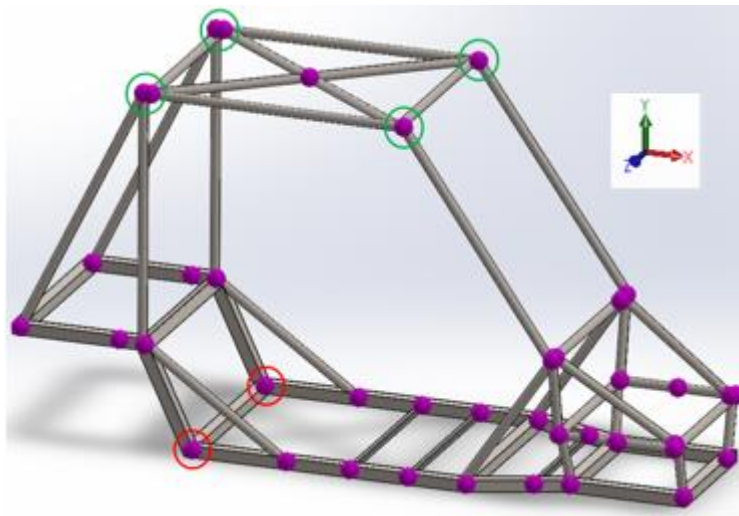


Figura 39. Condiciones de contorno aplicadas.

- **Cálculo de fuerzas actuantes:** Para calcular la velocidad con la que impactará contra el suelo, se realiza el cálculo siguiente (siendo  $d$  la distancia hasta el suelo):

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot d} = \sqrt{2 * 9,81 * 2} = 6,264 \text{ m/s}$$

Aplicando la fórmula de desaceleración (ec.1) empleada en el apartado 6.5.3, calculamos la fuerza con la que el techo del vehículo impactará contra el suelo:

$$D = \frac{\left(\frac{v_i - v_f}{t}\right)}{9,81} = \frac{\left(\frac{6,264 - 0}{0,1}\right)}{9,81} = 6,385G$$

Por lo que, aplicando el mismo procedimiento que en apartado anterior, calculamos la fuerza de impacto:

$$F = 9,81 * 400 * 6,365 = 24976 \text{ N}$$

Como en este caso vuelve a ser importante que el piloto no quede atrapado dentro del vehículo ni sufra daños por culpa del bastidor, interesa que la deformación no sea suficientemente grande como para que esto ocurra. Por ello, se ha tenido en cuenta el gráfico de desplazamientos, donde el máximo desplazamiento ha sido de 10,30 centímetros. Aunque es un valor suficientemente grande como para afectar a los componentes que se encuentran en el vehículo y podría generar averías, no es lo suficiente significativo como para atrapar al pasajero o lesionarlo. En la figura 40, donde las deformaciones están a escala real, se pueden apreciar estas deformaciones.

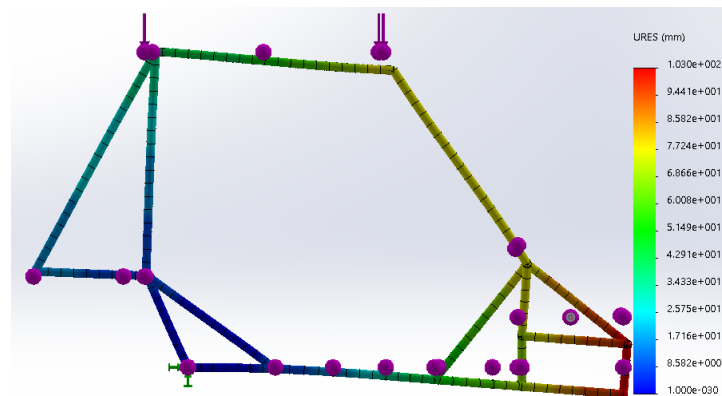


Figura 40. Deformación del bastidor después de la simulación de vuelco.

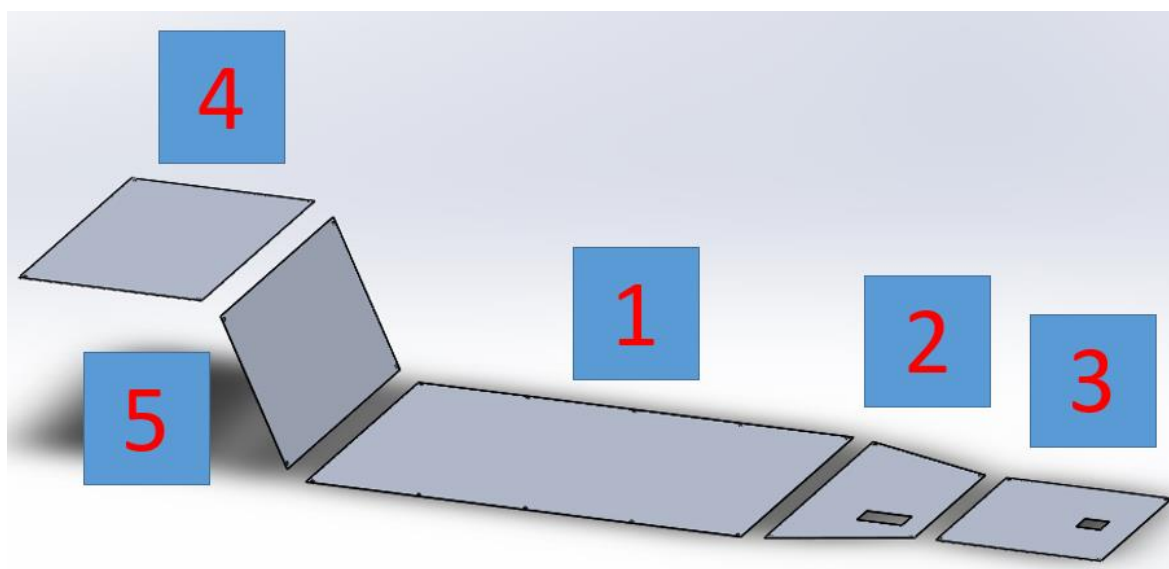
#### 6.6.5. Valoración de las simulaciones

Nuevamente, las simulaciones realizadas han resultado ser satisfactorias. Cabe destacar que estas simulaciones han mostrado que las modificaciones que se han realizado han favorecido en algunos casos la rigidez estructural, como en la situación de bache delantero, donde se ha observado una mejora sustancial (FDS pasa de 5,846 a 7,366). Además, el FDS en el caso de bache trasero y las deformaciones en los casos de impacto frontal y de vuelco son prácticamente idénticos. Por tanto, no solo hemos conseguido simplificar el modelo para su construcción, sino que además hemos podido mejorar su rigidez estructural.

#### 6.7. Suelo del vehículo

Para separar al pasajero del suelo, así como todos los objetos que se quiera llevar encima del vehículo, se decide colocar planchas de aluminio en los espacios que hay en la base (cabe recordar, como se menciona en el apartado 6.1, que “base” hace referencia a la parte del bastidor hecha con tubos cuadrados de acero 40x40x2 milímetros). El diseño de estas planchas deja un espacio de dos milímetros entre el acero del bastidor y el aluminio de éstas a rellenar posteriormente con silicona, a fin de evitar vibraciones o ruidos indeseables producidos por el roce entre el aluminio y el acero

(que podría darse en el caso de que se cortara el suelo sin dejar ningún espacio). Estas superficies irán ancladas al bastidor mediante monturas situadas en las esquinas de las mismas y al no ser elementos estructurales, se prescinde de su simulación. La única condición de resistencia se encuentra en la plancha que hace de suelo trasero, que deberá soportar el peso de las baterías durante el testeo y servirá como espacio de carga cuando el prototipo esté terminado pero se vio que las cuatro monturas de la parte trasera evitarían deformaciones en el aluminio. Más adelante, en el apartado 6.8.3 se hace referencia a estas monturas. En la figura 41, se ve puede ver el suelo con los agujeros necesarios para la construcción del prototipo, tanto de tornillería como los solicitados por otros componentes.

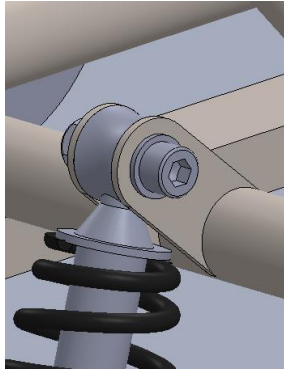


*Figura 41. Numeración del suelo del vehículo.*

## 6.8. Monturas

Se consideran monturas todas aquellas piezas que van soldadas al bastidor y que tienen la función de sujetar otros componentes del vehículo. En este apartado se tratarán una serie de monturas que se han empleado para diferentes funciones en el vehículo.

### 6.8.1. Monturas superiores de los amortiguadores delanteros



Estas monturas se encuentran en el punto que aparecía en los apartados 6.5.1 y 6.61 como lugar donde afectaban las fuerzas actuantes. Se sitúan por parejas, una a cada lado del amortiguador, con la función de mantener el amortiguador en el correcto lugar de trabajo en todo momento. La figura 42 muestra las simulaciones que se realizaron sobre esta pieza, que debía resistir en la superficie interior de su orificio el módulo de la fuerza actuante máxima, que se puede ver en el apartado simulación bache delantero (6.5.1 y 6.6.1). A pesar de que estos resultados nos ofrecían la posibilidad de reducir el grosor, la poca cantidad de masa que se reducía (menos de 10 gramos) frente al riesgo de tener menos margen de error en el momento de soldar, implicó que la opción de reducir el grosor de 3 milímetros a 2 milímetros fuera descartada.

Para realizar estas simulaciones, se tuvo que calcular el módulo de la fuerza actuante sobre un amortiguador en el caso de bache delantero (apartados 6.5.1 y 6.61) y dividir entre dos, ya que como se ha mencionado en este mismo apartado, estas monturas van siempre de dos en dos.

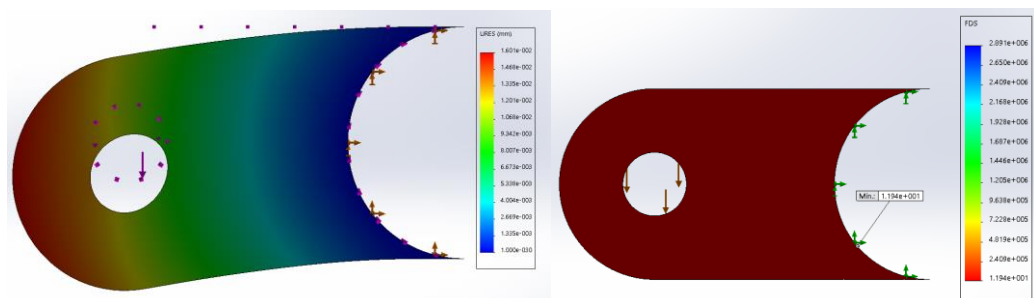


Figura 42. Deformaciones (derecha) y factor de seguridad (izquierda).

Como se puede ver en la figura 42, el coeficiente de seguridad es muy elevado en toda la pieza ( $FDS < 11,94$ ) y además la deformación es del orden de centésimas de milímetro (la magnitud de la deformación en la imagen esta ampliada por un factor de x364 y puede ser considerada como cero) y por lo tanto, esta pieza es válida para su uso.

### 6.8.2. Monturas de los trapecios de la suspensión

Estas monturas son necesarias para mantener los trapecios de la suspensión en su correcta posición. Requieren gran precisión en su montaje, ya que la alteración de su correcta posición podría afectar a la geometría de la suspensión y por consiguiente a la cinemática del vehículo. Se pueden contar dieciséis monturas de este tipo, diferenciando entre las ocho de los trapecios

superiores y las ocho de los trapecios inferiores, ya que tienen características geométricas diferentes.

Estas monturas se realizaron con acero de 3 milímetros de grosor, que se consideró más que suficiente debido al relativo bajo peso del vehículo y a la poca velocidad a la que este deberá circular. En la figura 43 se muestra una montura del trapecio inferior y en la figura 44 una del trapecio superior.

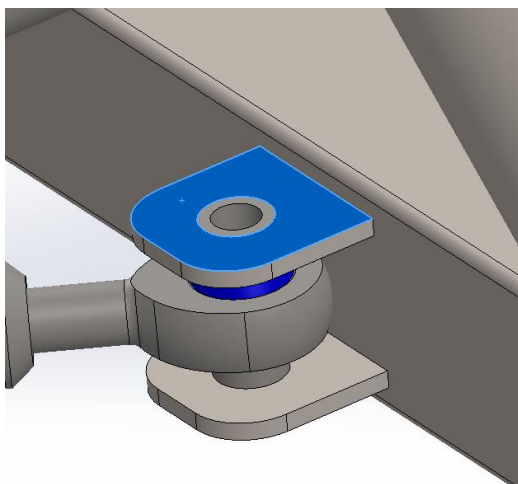


Figura 43. Monturas de los trapecios de la suspensión.

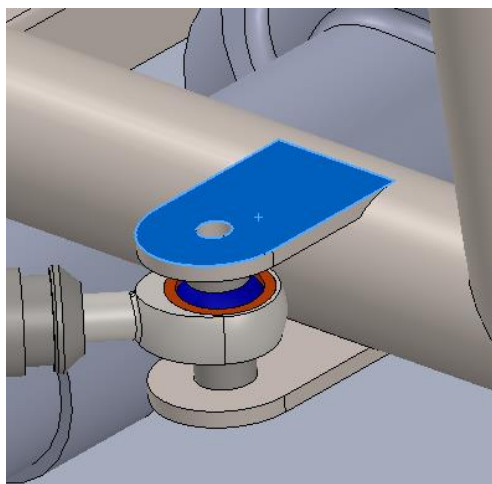


Figura 44. Monturas de los trapecios superiores

### 6.8.3. Monturas del suelo

Como se ha comentado en el apartado 6.7, el suelo está sujeto por unas monturas similares a las vistas anteriormente. Para estandarizar la construcción del bastidor, se ha decidido que todas las planchas del suelo sean sujetas por las mismas cuatro monturas en las esquinas. Las únicas excepciones son las que sujetan el suelo número 2 (se puede ver en el apartado 6.7), ya que debido a su geometría no cuadrada se requirió el diseño de monturas específicas y el suelo número 1, que debido a su longitud requirió monturas en medio de dos de los cuatro lados para evitar que las planchas de aluminio se deformaran por su propio peso con el tiempo.

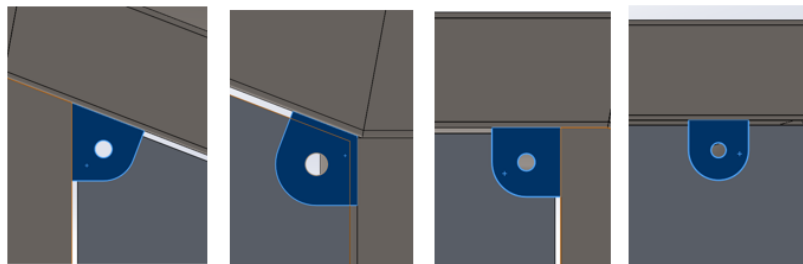


Figura 45. Monturas del suelo.



## 7. SISTEMA DE SUSPENSIÓN

### 7.1. Conceptos Básicos

A lo largo del apartado 7 de esta memoria, se tratarán y estudiarán elementos relacionados con el sistema de suspensión y la dinámica de vehículos, los cuales han servido para el diseño de la suspensión del vehículo autónomo.

Es por ello que para la correcta comprensión del presente apartado de la memoria es necesario explicar una serie de conceptos básicos acerca del chasis y la suspensión de los automóviles.

#### 7.1.1. Sistema de coordenadas utilizado

En primer lugar se procederá a explicar el sistema de coordenadas utilizado para el diseño del prototipo, ya que para explicar posteriormente algunos conceptos será necesario hacer referencia al sistema de coordenadas escogido.

A continuación se especificará donde se encuentran ubicados cada uno de los elementos de referencia que componen dicho sistema:

- Origen de coordenadas: Es el punto en que los valores de las tres componentes espaciales son nulos (0,0,0). En altura, se encuentra en el plano paralelo al suelo que pasa por el centro de los tubos de perfil cuadrado inferiores de la base del bastidor, en amplitud se encuentra en el plano medio del coche y en longitud se encuentra 200mm por detrás del eje delantero. En la figura 46 se puede apreciar más claramente la ubicación del origen de coordenadas.

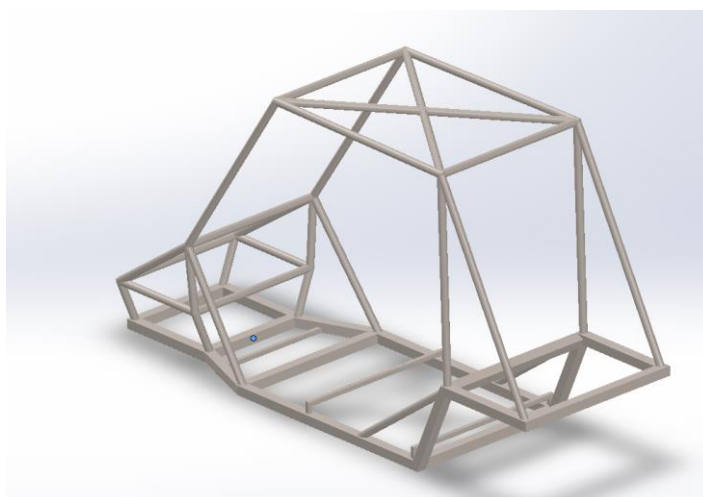


Figura 46. Situación del origen de coordenadas



- Eje X: este eje (también llamado eje longitudinal del vehículo) es paralelo al suelo, coincide con la dirección de avance y adquiere valores positivos en el sentido del avance del vehículo.
- Eje Y: este eje (también llamado eje vertical) es normal al suelo. Adquiere valores positivos por encima del suelo.
- Eje Z: este eje (también llamado eje transversal u horizontal) es paralelo al suelo y perpendicular al eje X. Desde la situación del piloto, el eje Z adquiere valores positivos hacia el lado derecho del coche.

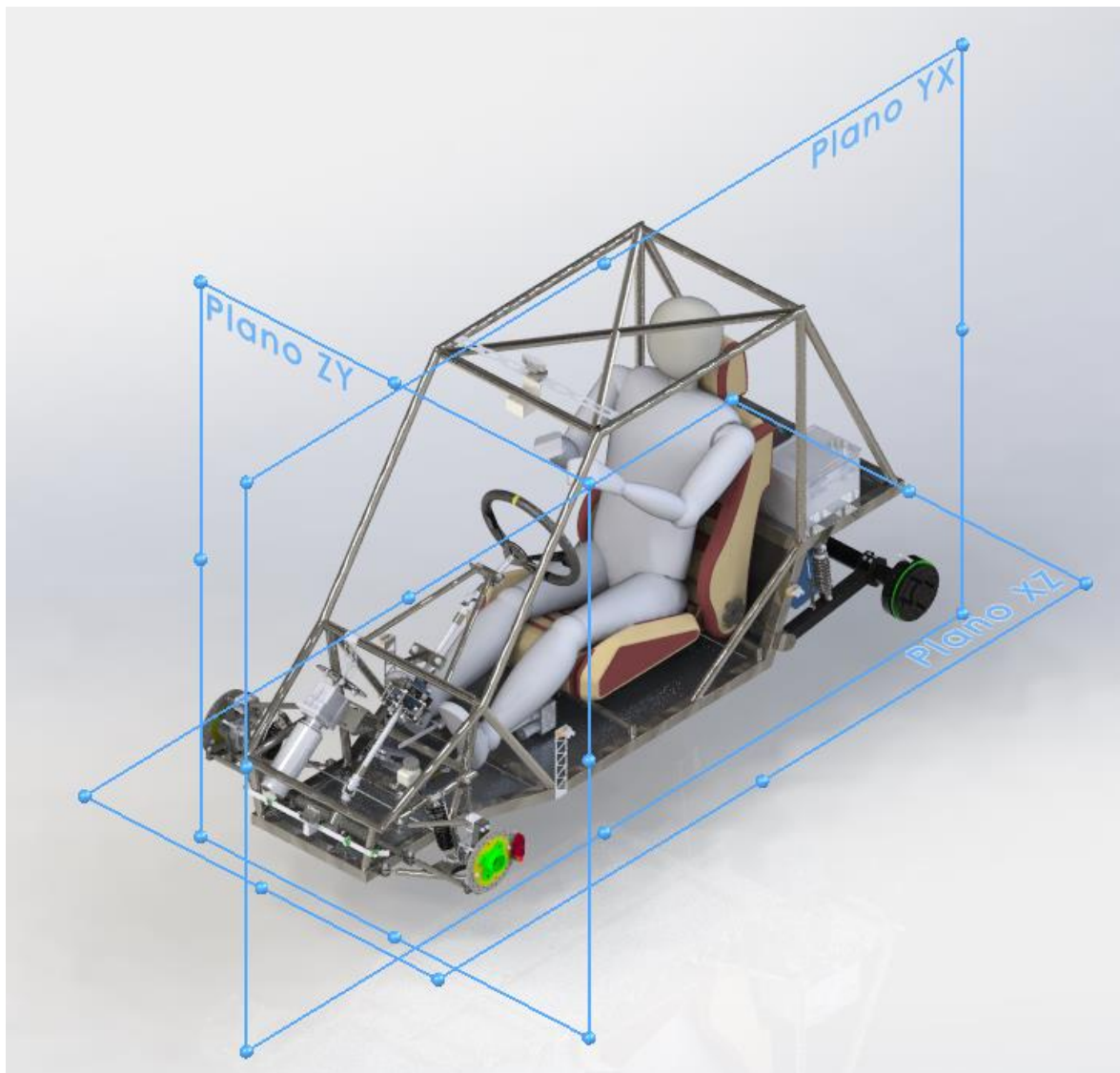


Figura 47. Vista de los planos principales

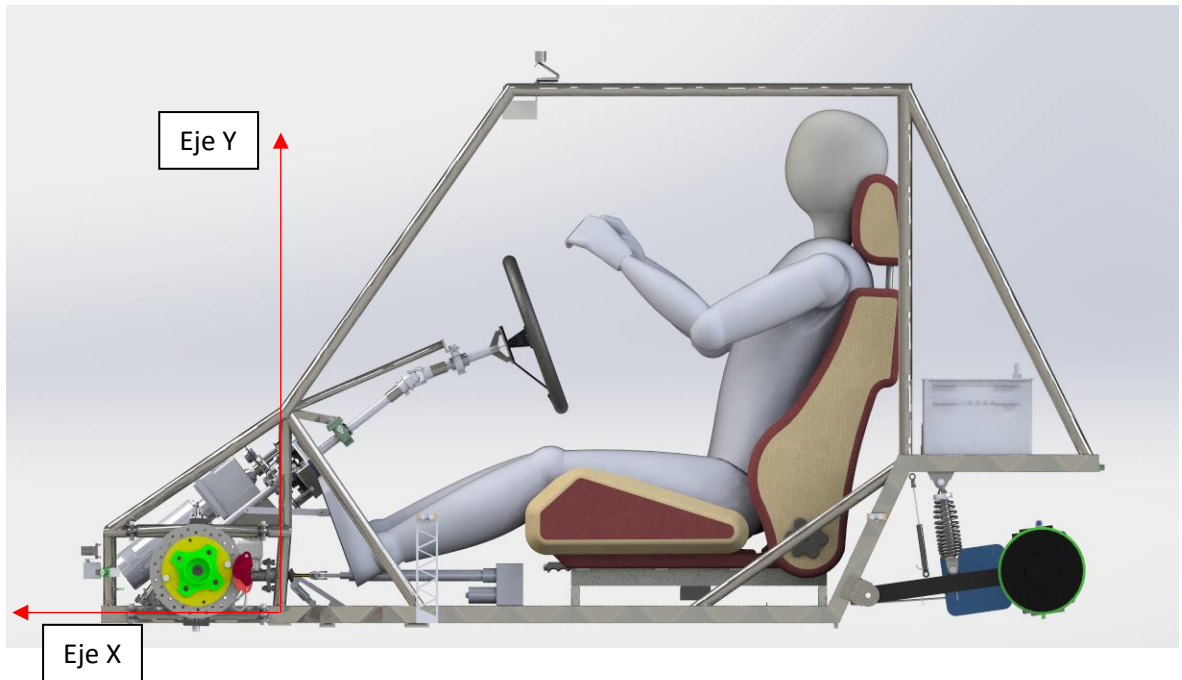


Figura 48. Plano YX

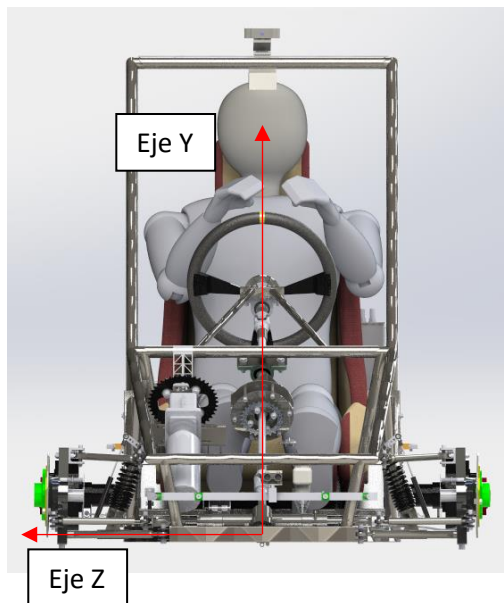


Figura 49. Plano ZY

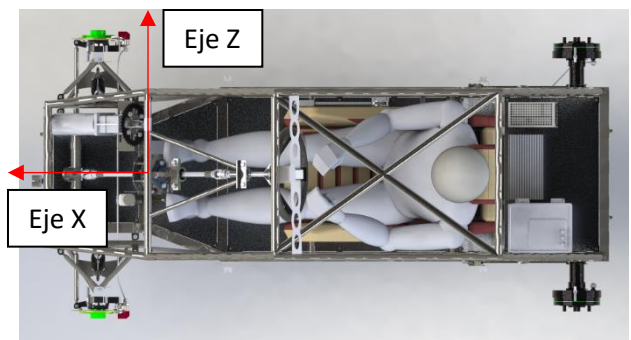


Figura 50. Plano XZ

### 7.1.2. Ángulo de caída (o *camber*)

El ángulo de caída es el ángulo entre el plano de la rueda y el plano vertical del vehículo (plano XZ). Se considera que el *camber* es positivo cuando la parte superior de la rueda se aleja del vehículo y negativo cuando se acerca. Se puede observar claramente el concepto del ángulo de caída en la figura 51.

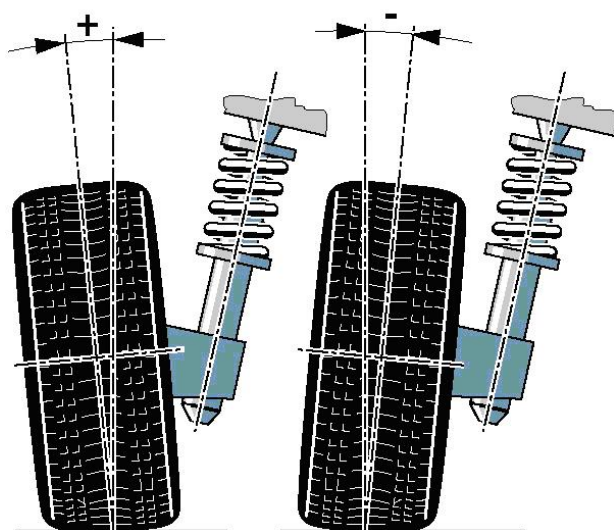


Figura 51. Ángulo de caída

Este ángulo está directamente relacionado con el agarre del vehículo. Los vehículos utilitarios suelen tener un ángulo de caída neutro o ligeramente negativo. En cambio, en los vehículos de competición el camber tiende a valores negativos, tanto es así, que en algunos vehículos de diferentes disciplinas (sobre todo en los monoplazas) se suelen alcanzar valores de  $-10^\circ$ .

El ángulo de caída es un parámetro que varía con el recorrido de la suspensión. Es por ello que al hacer el estudio de la cinemática de la suspensión diseñada hay que comprobar que el camber no varíe a niveles no deseados en los extremos del recorrido de la suspensión.

Debido a esta variación del camber según el recorrido de la suspensión, se suele definir el valor deseado con el vehículo en estado de orden de marcha (ver glosario) y comprobar que el parámetro no varíe a lo largo del recorrido de la suspensión. Si varía a valores no deseados es necesario volver a diseñar los componentes de la suspensión.

En el caso del vehículo autónomo solo se ha podido decidir el camber de las ruedas delanteras, ya que el eje rígido de las ruedas traseras no permite ajuste del ángulo de caída.

Realizando un estudio de los vehículos utilitarios actuales, consultando la bibliografía (referencia [1]) y con gente experta del equipo de formula student de MAMI se ha decidido diseñar la suspensión delantera con un camber en orden de marcha de  $-1^\circ$  y aceptar valores según el recorrido de la rueda de entre  $1^\circ$  y  $-3^\circ$ .

### 7.1.3. Centro instantáneo de rotación (CIR)

En el ámbito de los sistemas de suspensión de dobles triángulos superpuestos (en el apartado 7.2.3 se explica este sistema), el centro instantáneo de rotación hace referencia al punto de coincidencia entre la prolongación de los trapecios considerada desde la vista frontal y representa el punto respecto al cual la rueda traza su trayectoria en un instante determinado de tiempo. Este punto cambia según el recorrido de la suspensión y de los trapecios, por eso es un punto instantáneo.

Este punto tiene gran influencia sobre el ángulo de caída de las ruedas y es necesario para definir el *Centro de balanceo*, definido a continuación.

### 7.1.4. Centro de balanceo (Roll centre)

Se define como el punto del plano transversal que incluye los centros de las ruedas de un eje sobre el cual rota la masa suspendida (ver apartado 7.1.8) en un instante determinado.

Se puede ubicar este punto gráficamente mediante la intersección del plano longitudinal (plano YX en el caso del prototipo) con la línea imaginaria que une el CIR y el centro de la zona de contacto del neumático. Se puede ver gráficamente como ubicar el CIR y el Centro de balanceo en la figura 52.

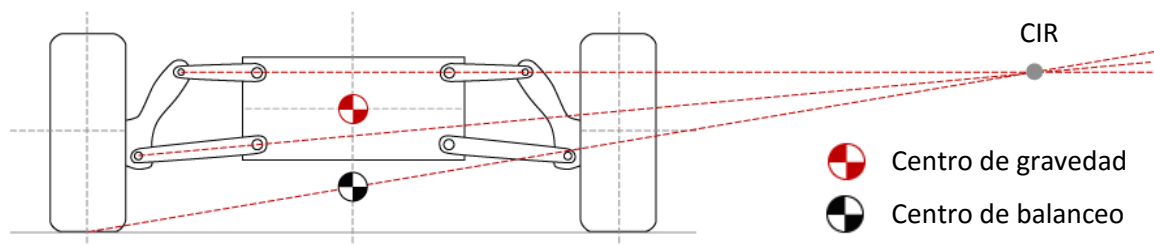


Figura 52. Ubicación del CIR y del centro de balanceo

El balanceo que se genera en un instante determinado se define como el momento generado por la resultante de las fuerzas en el centro de gravedad aplicado sobre el centro de balanceo.

Por ello es interesante tener el centro de balanceo lo más cerca posible del centro de gravedad, aunque también es interesante que el centro de balanceo esté próximo al nivel del suelo para que no se cree el fenómeno conocido como efecto levantamiento (o hundimiento, en el caso de que el centro de balanceo esté por debajo del nivel del suelo) o *Jacking Effect* en inglés. Este fenómeno surge como resultado de las fuerzas laterales generadas en los neumáticos. Este efecto es totalmente indeseado y perjudicial para el correcto funcionamiento dinámico del vehículo. Para

evitarlo es necesario tener el centro de balanceo lo más próximo posible al nivel del suelo. Es por ello que a la hora de diseñar la suspensión hay que encontrar un compromiso entre situar el centro de balanceo próximo al centro de gravedad y situarlo próximo al nivel del suelo.

#### 7.1.5. Eje *Kingpin*

Es el eje que pasa por los dos puntos de unión de los trapecios y la mangueta. Estos puntos están representados en la figura 53 como LBJ (Lower ball joint) y Low UBJ (Upper ball joint).

#### 7.1.6. Ángulo Caster

Es el ángulo que se genera entre el eje Kingpin y el plano vertical que contiene el eje de las ruedas, ya sea el delantero o el trasero. En la figura 53, se puede ver representado el concepto de ángulo Caster así como también el del eje Kingpin.

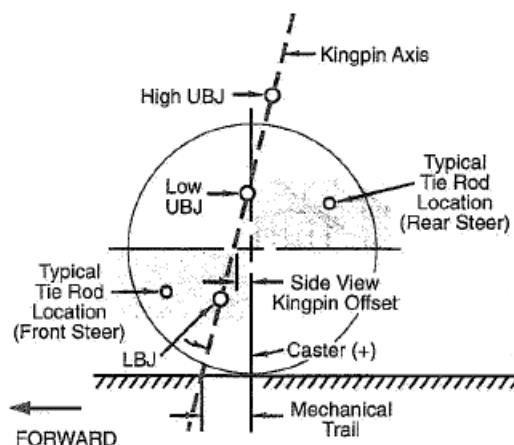


Figura 53. Eje Kingpin y ángulo Caster (página 625, ref. [2])

El valor del ángulo Caster es positivo si el punto de unión entre el trapecio inferior y la mangueta (LBJ) está más adelantado que el punto de unión superior (Low UBJ).

El ángulo Caster suele definirse entre valores que van desde 1 y hasta 10 grados positivos en vehículos de competición. Eso se debe a que tener este ángulo en valores positivos hace que al girar la dirección, aparezca en las ruedas una fuerza resultante que tiende a volverlas a alinear, por lo que tener el ángulo Caster en valores ligeramente positivos hace que mejore el confort de conducción y el comportamiento de la dirección.

Para el prototipo se ha definido un ángulo Caster de 3º positivos. La decisión de qué valor exacto escoger se ha tomado con la ayuda de los consejos y la experiencia de miembros del equipo de

Formula Student MAMI, ya que el saber determinar el valor óptimo de este ángulo para un coche sólo se consigue con la experiencia de haber diseñado muchos coches.

#### 7.1.7. Centro de gravedad

Es el punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre todas las porciones de material del cuerpo, de tal manera que el momento respecto a cualquier punto de esta resultante aplicada en el centro de gravedad es el mismo que el producido por toda la masa que conforma el cuerpo.

El estudio del Centro de gravedad del vehículo es importante de cara a saber el reparto de peso entre ejes y de cara al estudio de la suspensión.

#### 7.1.8. Masa suspendida

Se trata de toda la masa que sostienen los amortiguadores y muelles de la suspensión. Suele ser todo el bastidor del coche más todo el peso que va montado sobre este (carrocería, motor, habitáculo, etc.).

Para realizar los cálculos de la carga de los amortiguadores a la hora de diseñar la suspensión es necesario trabajar con la masa suspendida.

#### 7.1.9. Masa no suspendida

Es la masa de todos los elementos que no están soportados por los amortiguadores, es decir, la masa de las ruedas, manguetas, trapecios de suspensión, etc.

La suma de la masa no suspendida más la suspendida tiene que dar el peso del vehículo en vacío.

#### 7.1.10. Ángulo de convergencia o divergencia de las ruedas (Toe en inglés)

Es el ángulo que forma el plano de la rueda con el plano longitudinal (plano YX del prototipo) del vehículo. Cuando los planos de las ruedas delanteras se acercan hacia la parte frontal del vehículo se trata de un caso de convergencia o Toe in y cuando se acercan hacia la parte trasera el ángulo es de divergencia o Toe out. En el caso de las ruedas traseras del vehículo es el contrario.

Este ángulo afecta sobre todo a la estabilidad y a la agilidad del vehículo al girar. Los vehículos de tracción delantera suelen presentar convergencia nula o una ligera divergencia para compensar la convergencia que genera el par motriz. En el caso de los coches de tracción trasera, el vehículo siempre presenta convergencia para mejorar la estabilidad del tren trasero.

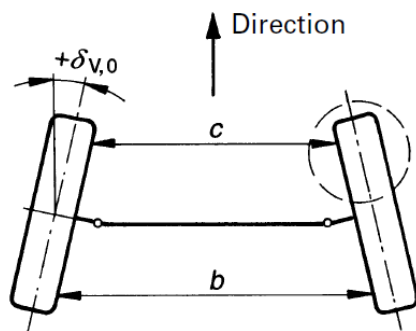


Figura 54. Ángulo de convergencia de las ruedas

Para el prototipo se ha decidido configurar este ángulo con  $1^\circ$  convergente en las ruedas delanteras en el estado de orden de marcha. Este ángulo se puede variar fácilmente ajustando los *rod ends* de los *tie rods* (estos componentes se explicarán más detalladamente en el apartado 8 de esta memoria).

## 7.2. Tipos de suspensión

A lo largo de la historia del automovilismo se han inventado multitud de sistemas de suspensión, de los cuales algunos se han convertido en sistemas muy utilizados en los vehículos actuales y otros han caído en desuso o se utilizan solo para vehículos especiales.

A la hora de diseñar un sistema de suspensión es necesario conocer los diferentes tipos que hay, o al menos los más comunes, para escoger cual es el más conveniente para el vehículo que se quiere construir. Es por ello que en este apartado se hará una breve explicación de los tipos de sistemas de suspensión más utilizados y que podrían servir para el prototipo autónomo.

Se pueden diferenciar los sistemas de suspensión en tres grandes familias: independientes, semi rígidas y rígidas o dependientes. Las independientes son aquellas a las que el movimiento de una rueda no afecta directamente a la otra rueda de su mismo eje. En cambio, en los sistemas dependientes el movimiento de una rueda afecta directamente a la otra rueda de su mismo eje.

Los sistemas semi rígidos son un sistema intermedio entre los sistemas dependientes e independientes: el movimiento de una rueda se transmite parcialmente a la otra rueda del mismo eje.

Dentro de estas tres grandes familias existen diversos tipos de suspensión. A continuación se procederá a explicar los tipos más comunes de cada familia.



### 7.2.1. Sistemas de suspensión dependientes

- **Suspensión de eje rígido**

Este tipo de suspensión está compuesto por un eje rígido que une las dos ruedas y los elementos de amortiguación (ballesta, muelles helicoidales o amortiguadores) que unen el eje rígido con el bastidor y amortiguan el movimiento relativo entre estos. En los casos en que el elemento de amortiguación es de tipo muelle/amortiguador, el eje rígido suele estar también conectado al bastidor por dos brazos que soportan las fuerzas longitudinales. En la figura 55 se puede apreciar el sistema de suspensión de eje rígido para el caso de un eje trasero motriz con ballestas y amortiguadores de un vehículo comercial ligero (Volkswagen lt).

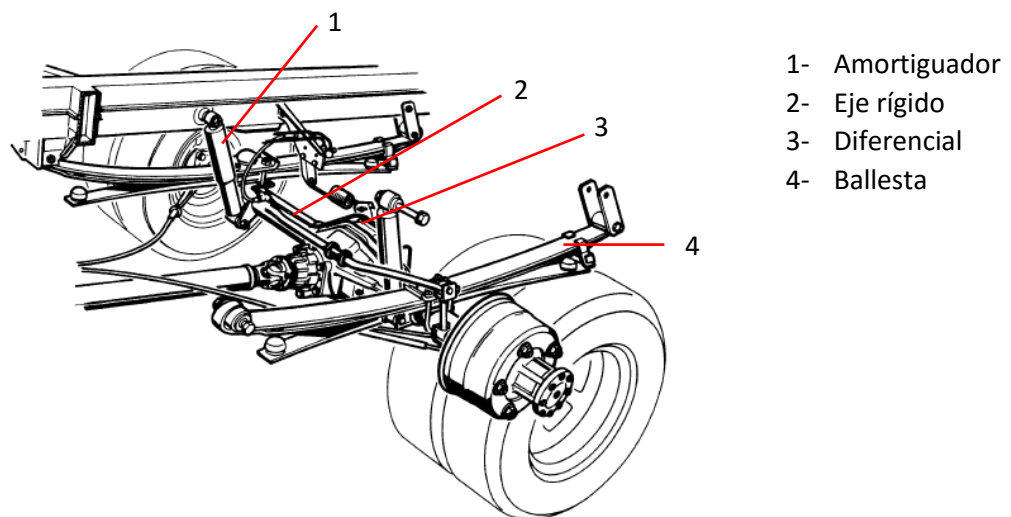


Figura 55. Eje rígido, Volkswagen lt (pág. 23 ref.[1])

Este tipo de suspensión presenta diversas ventajas pero también diversos inconvenientes:

**Ventajas:**

- Es un sistema sencillo mecánicamente y fácil de construir, sobre todo si se compara con el resto de sistemas de suspensión.
- Es un sistema barato, en comparación con el resto. El hecho de que tenga una mecánica sencilla y pocos componentes lo convierte en una opción barata.
- No varía el camber, la convergencia de las ruedas, ni tampoco el ancho de vía en todo el recorrido de la suspensión.
- Permite grandes recorridos de suspensión.



#### Inconvenientes:

- Las ruedas tienen influencia mutua. Debido a su concepción, las vibraciones de una rueda se transmiten a la otra a través del eje rígido, por lo que las fuerzas y momentos que afecten a una rueda se transmitirán también a la otra.
- Requiere mucho espacio. El hecho de que sea todo el conjunto del eje (más el diferencial si se trata de un eje motriz) el que se mueve al actuar la suspensión, hace que este sistema requiera de un espacio libre a su alrededor mucho más grande que las otras opciones de suspensión.
- Limitado potencial para configurar la cinemática de la suspensión.
- Elevado peso. La masa no suspendida del vehículo es más grande que con otras opciones de suspensión, ya que se debe incluir el peso del eje, que suele ser bastante pesado.

Estas ventajas e inconvenientes hacen que este tipo de suspensión se aplique casi en su totalidad para vehículos industriales, autobuses, vehículos todoterreno y camiones.

Con el paso del tiempo se han incorporado diversos tipos de barras estabilizadoras a este tipo de suspensión para intentar mitigar la influencia mutua de las ruedas y mejorar la estabilidad del vehículo. La más común es la barra Panhard, la cual conecta el eje rígido con el bastidor. En la **figura X**, en la cual se muestra la suspensión trasera de un vehículo todoterreno ligero (Lada Niva), se puede apreciar la barra estabilizadora Panhard. En la figura 56 el sistema de suspensión de eje rígido está compuesto por el conjunto muelle/amortiguador, a diferencia de la figura 55, que está compuesto por ballesta/amortiguador. Esta configuración requiere de brazos longitudinales, los cuales impiden el movimiento longitudinal del eje rígido.

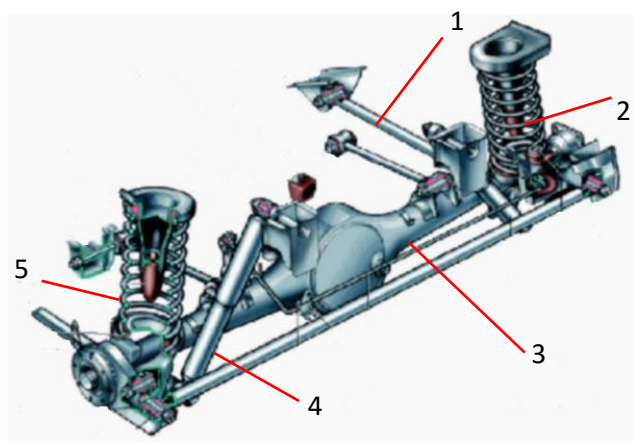


Figura 56. Eje rígido con barra Panhard

- 1- Brazo longitudinal
- 2- Amortiguador
- 3- Eje rígido
- 4- Barra Panhard
- 5- Muelle helicoidal

### 7.2.2. Sistemas de suspensión semi rígidos

- **Suspensión de eje torsional** (Twist-beam suspension)

Este tipo de sistema de suspensión se empezó a emplear en los años 70 y se ha mantenido hasta la actualidad como una de las opciones más utilizadas para el eje trasero, sobre todo en los utilitarios pequeños y medianos de tracción delantera.

Se denomina semi rígido porque, al igual que la suspensión de eje rígido, las ruedas están unidas entre sí pero transmiten de forma parcial las oscilaciones que reciben del terreno.

La figura 57 muestra la suspensión trasera de un VW Golf IV. En ella se puede apreciar los elementos que componen este tipo de suspensión.

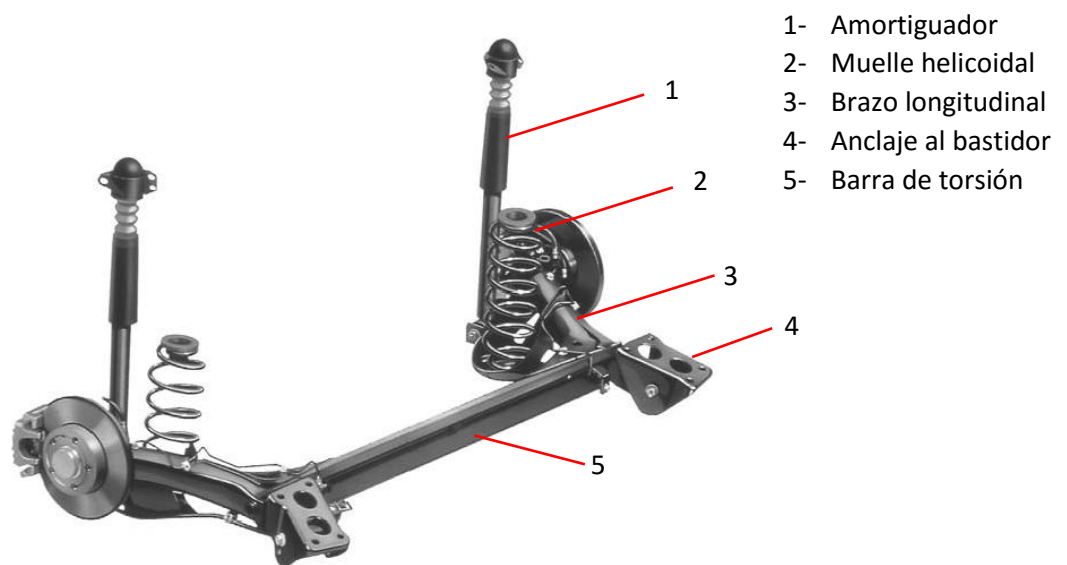


Figura 57. Suspensión de eje torsional, VW Golf IV (pág. 29, ref. [1])

Se compone de dos brazos longitudinales soldados a una barra que soporta la torsión. Esta suele tener un perfil en U para poder absorber elásticamente los momentos verticales y laterales. Esta barra, a su vez está conectada por otros brazos longitudinales al bastidor.

Este tipo de suspensión no necesita de barra antivuelco, ya que el propio eje torsional hace la función de ésta estabilizando el vehículo.

Este tipo de suspensión tiene numerosas ventajas y es por ello que multitud de vehículos que actualmente están en el mercado siguen utilizándolo.

**Ventajas:**

- El sistema entero es fácil de ensamblar y desensamblar.
- Necesita poco espacio
- Tiene pocos componentes

- Baja masa no sostenida
- El eje torsional puede funcionar como barra antivuelco

Inconvenientes:

- Alto estrés en los cordones de soldadura
- La carga permisible en el eje trasero está limitada a la resistencia de los cordones de soldadura.
- Las ruedas tienen influencia mutua.

### 7.2.3. Sistemas de suspensión independientes

- **Suspensión de dobles triángulos superpuestos**

También denominada como suspensión de paralelogramos deformables o suspensión por trapecio articulado. Este tipo de suspensión se considera como el sistema ideal en cuanto al control de la geometría de la suspensión se refiere, ya que permite saber exactamente la posición de la rueda en todo momento del recorrido de la suspensión.

Este sistema consiste en dos brazos en forma de A, uno en la parte inferior y otro en la superior, denominados trapecios de suspensión. Estos trapecios van unidos mediante rótulas a la mangueta y mediante travesaños al bastidor, de esta forma se cierra el paralelogramo. El conjunto muelle amortiguador se une por un lado al trapecio inferior y por el otro al bastidor.

Para mejorar la estabilidad del vehículo este tipo de suspensión se suele reforzar con barras antivuelco.

Se puede observar claramente en la figura 58 los componentes de este tipo de suspensión.

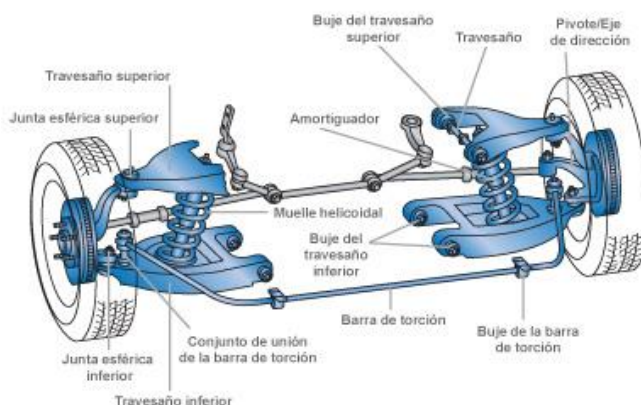


Figura 58. Suspensión de dobles triángulos superpuestos

Por sus buenas cualidades dinámicas, este tipo de suspensión se suele aplicar para vehículos deportivos o de gama alta. En la figura 59 se puede observar la aplicación de este tipo de suspensión en el eje delantero del vehículo deportivo Audi R8. En este caso la configuración de la suspensión es para eje motriz.



*Figura 59. Suspensión de dobles triángulos superpuestos, Audi R8*

#### Ventajas:

- Control total sobre la cinemática de la suspensión
- No hay influencia mutua entre ruedas

#### Inconvenientes

- Ocupa mucho espacio en comparación con otras soluciones como la suspensión McPherson.

- **Suspensión Multibrazo o Multilink**

Se trata de la evolución de la suspensión de dobles triángulos superpuestos. En vez de utilizar dos trapecios para cerrar el paralelogramo de suspensión, utiliza varios brazos articulados para realizar la función de estos. Las configuraciones más habituales cuentan con 4 o 5 brazos. En la figura 60 se puede ver el eje delantero de un Audi Q5, el cual utiliza un sistema multilink de 5 brazos.

**Audi Q5**  
**Fünflenker-Vorderachse**  
Five link front axle  
07/08



*Figura 60. Suspensión Multilink, Audi Q5*

Este tipo de suspensión cuenta con las mismas ventajas e inconvenientes que la suspensión de triángulos superpuestos, con la diferencia de que requiere un mayor coste en el diseño y sus componentes, pero ofrece la ventaja que con un buen diseño se puede conseguir que las fuerzas se distribuyan mejor que con la suspensión de dobles triángulos superpuestos. Debido a ello este tipo de suspensión solo lo suelen utilizar vehículos de gama alta.

- **Suspensión McPherson**

Este tipo de sistema de suspensión es de los más utilizados actualmente en el mercado automovilístico. Se puede utilizar tanto en el eje delantero como en el eje trasero, aunque se suele utilizar más habitualmente en el delantero, ya que este tipo de suspensión proporciona el espacio necesario para el alojamiento del motor.

La suspensión McPherson es uno de los tipos de suspensión que menos componentes requiere. Está compuesta por un brazo inferior oscilante, unido por un lateral al bastidor con vástagos y por el otro lado a la mangueta con una rotula esférica. En la mangueta está fijado el conjunto muelle amortiguador, el cual cierra el triángulo de la suspensión con el bastidor.

En la figura 61 se puede apreciar los componentes de la suspensión McPherson para una rueda motriz.

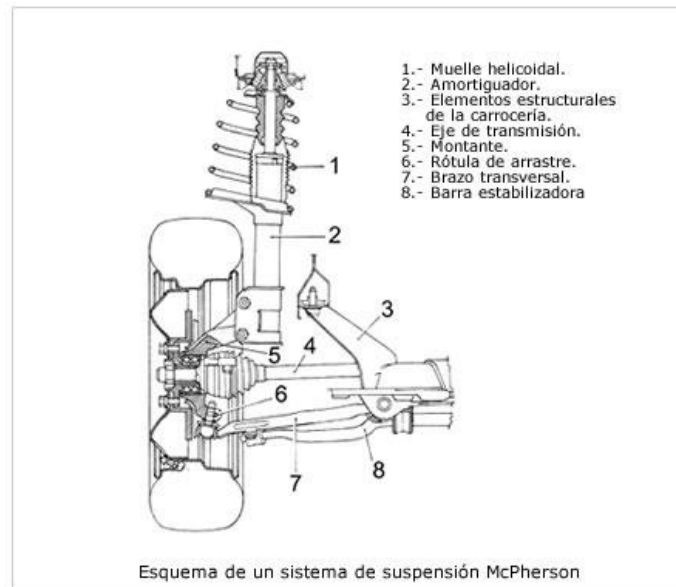


Figura 61. Suspensión McPherson

Este tipo de suspensión suele también utilizar barras estabilizadoras para mejorar la dinámica del vehículo.

En la figura 62 se muestra la suspensión delantera del vehículo Audi S1, la cual utiliza la configuración McPherson para ruedas motrices.

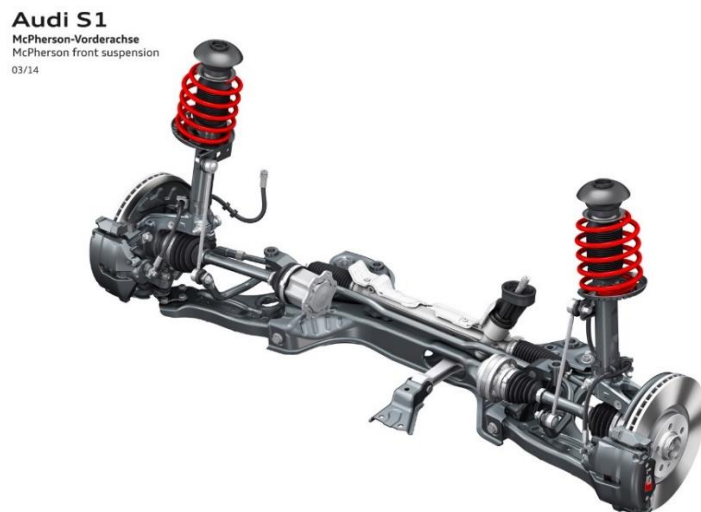


Figura 62. Suspensión McPherson, Audi S1

Ventajas:

- Pocos componentes
- Deja mucho espacio en el compartimento del motor. Esto la convierte en la suspensión ideal para los vehículos con motor transversal.

- No hay influencia mutua entre ruedas.
- Permite alojar amortiguadores y muelles con grandes recorridos.

Inconvenientes:

- Peores propiedades cinemáticas respecto a la suspensión de dobles triángulos superpuestos.
- Transmisión de más vibraciones a la carrocería a través del pivote del conjunto muelle/amortiguador.
- Necesidad de un miembro estructural a una altura bastante grande para poder soportar el pivote McPherson.

### 7.3. Diseño del sistema de suspensión del eje trasero del prototipo

Tal y como se ha mencionado anteriormente en esta memoria, en el momento en que se llegó a Moscú (marzo de 2016) el proyecto ya estaba iniciado desde setiembre de 2015. Aunque el trabajo que había hecho era muy pobre y no se ha podido aprovechar casi nada para el diseño del prototipo que se ha construido, ya habían comprado algunos componentes como es el motor eléctrico que mueve el coche, el cual es solidario a un eje rígido que incorpora el diferencial y tambores de freno. En la **figura X** se puede ver este componente.

Debido a que es un componente caro, no ha habido opción de prescindir de él, por lo que no se ha podido escoger el tipo de sistema de suspensión del eje trasero y se ha tenido que emplear el sistema de eje rígido. Este hecho no implica que la solución de eje rígido no fuera la mejor, simplemente implica que no se han estudiado otras opciones. De hecho ha resultado ser una muy buena opción debido a su sencillez y a que no se ha tenido que buscar un alojamiento especial para el motor, ya que este es solidario al propio eje.

Para la correcta aplicación de este sistema se han tenido que diseñar y construir dos brazos longitudinales, los cuales por un lado sostuvieran el eje rígido y por el otro lado estuviera unidos al bastidor mediante un vástago que permitiera la oscilación vertical del brazo.

También se ha tenido que decidir la ubicación de los conjuntos muelle/amortiguador, así como diseñar y construir las monturas para sostenerlos.

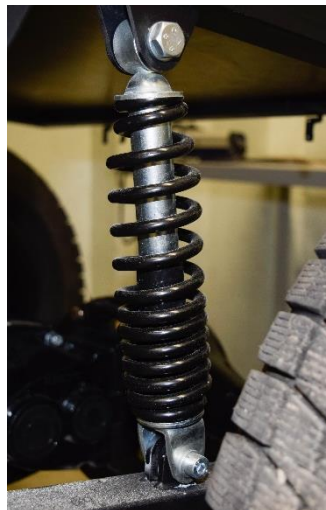
A continuación se explicarán con más detalle todas estas tareas realizadas.



### 7.3.1. Conjunto muelle/amortiguador

Al igual que el motor, los amortiguadores y muelles ya estaban comprados en el momento en que se llegó a Moscú, y no había opción de cambiarlos, por lo que no se estudió otras opciones del mercado.

El conjunto muelle/amortiguador que se ha utilizado en el prototipo, tanto en la suspensión delantera como en la trasera, está diseñado originalmente para la suspensión trasera de una moto tipo Scotter y es de la compañía Leader Aid Enterprise. El modelo en cuestión es el 3YG-22210-00, el cual tiene un recorrido máximo de 50mm, una longitud máxima de 225mm y un muelle variable, es decir, que la distancia entre las vueltas del resorte no es constante a lo largo de todo el muelle. Esto es para que sea suave para pequeños baches y que transmita más confort. La mayoría de scotters tienen este tipo de muelle, ya que son motos pensadas para ir por ciudad a baja velocidad. En la figura 63 se puede ver el amortiguador montado en el prototipo y en la figura 64 el modelo realizado del mismo con el software Solidworks 2015.



*Figura 63. Conjunto muelle/amortiguador real*



*Figura 64. Modelo del conjunto muelle/amortiguador realizado en Solidworks 2015*

Para poder diseñar la suspensión, el primer paso que hubo que hacer fue caracterizar estos amortiguadores, es decir, estudiar cuanto se comprimen según la carga que se les aplica.

Este estudio es necesario por diversas razones. En primer lugar, para saber si estos amortiguadores serán capaces de sostener toda la masa suspendida de manera óptima, es decir, no solo es necesario que sean capaces de soportar la masa suspendida en orden de marcha, sino que debe de tener por lo menos un 50% del recorrido por comprimir para que cuando el vehículo esté en movimiento los amortiguadores tengan suficiente recorrido para absorber los movimientos del



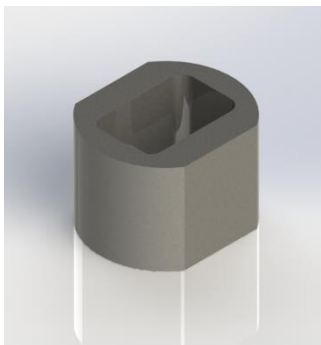
bastidor debido a las frenadas y las aceleraciones, y también para absorber las irregularidades del terreno.

En segundo lugar, este estudio es necesario para saber cuánto estará comprimido el amortiguador en orden de marcha, que es el estado en el que se diseña el coche, y así saber su longitud total bajo la carga que soportará en estado de orden de marcha.

Para realizar este estudio se sometió al conjunto muelle/amortiguador a una prueba estática de carga en una prensa diseñada para este tipo de estudios. El estudio consistía en ir aumentando la fuerza que realizaba la prensa y observar el recorrido que se comprimía para cada valor diferente de carga.

También es necesario mencionar que para realizar esta prueba en correctas condiciones sin estropear el conjunto muelle/amortiguador fue necesario mecanizar unos soportes a medida.

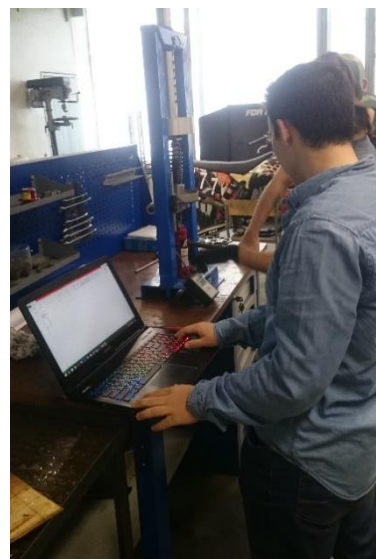
En la figura 65 se puede ver el modelo CAD del soporte mecanizado para la parte superior del amortiguador. En la figura 66 y 67 se pueden ver unas fotografías del momento en que se realizó el ensayo.



*Figura 65. Modelo del soporte mecanizado*

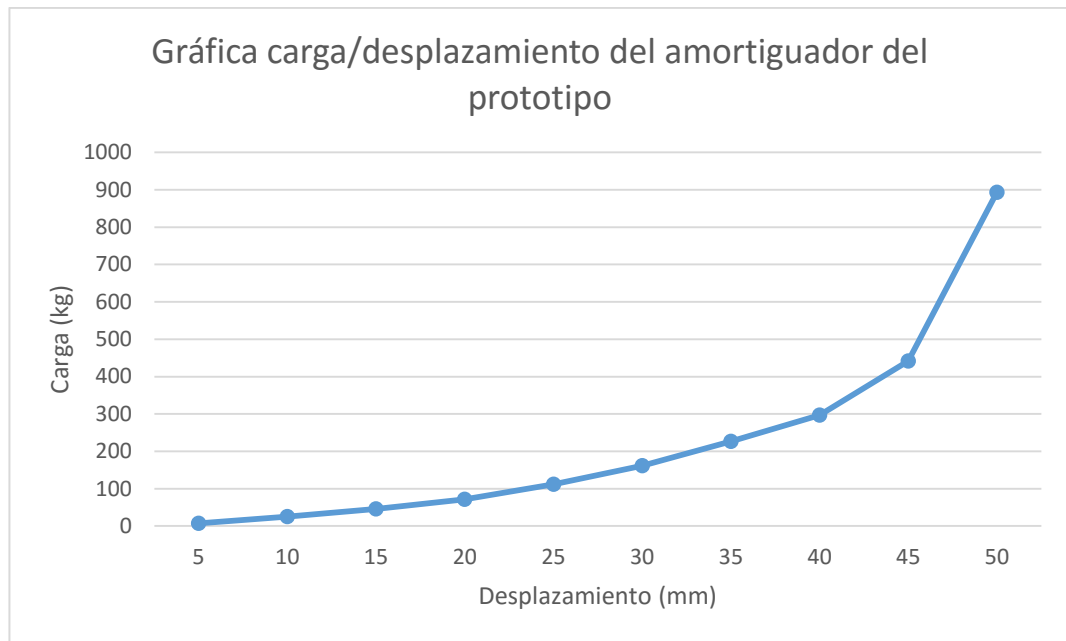


*Figura 66. Elementos de la prueba*



*Figura 67. Realización de la prueba*

De este ensayo se obtuvo la gráfica 1, la cual muestra cuánto se comprime el amortiguador para diferentes valores de carga.



*Gráfica 1. Carga/desplazamiento del amortiguador*

Una vez realizado este ensayo, el siguiente paso en el diseño de la suspensión fue realizar el cálculo de carga estimado que tendría cada amortiguador en estado de orden de marcha.

Para ello fue necesario realizar una estimación del valor de la masa suspendida, y la manera más rápida y precisa de hacer esto es estimar la masa no suspendida y restarla al peso deseado con un pasajero (en el apartado 5.2.4 de esta memoria se especificó un valor de 400 kg). Se realiza de este modo debido a que la masa no suspendida tiene menos componentes y por lo tanto al estimar su masa se acumula menos error.

La estimación de la masa no suspendida se ha hecho de la siguiente manera:

- Motor eléctrico, eje rígido y tambores traseros de freno= 53kg.
- Neumáticos, llantas, manguetas, discos y pinzas de freno= 80kg
- Elementos de la suspensión: trapecios delanteros, brazos longitudinales= 20kg

Por lo que la estimación total de la masa no suspendida es de 150kg, lo que deja 250kg si se cumplen las especificaciones deseadas.

El siguiente paso para calcular la carga de cada rueda en estado de orden de marcha es calcular utilizando el reparto de 40/60 deseado (especificado en el apartado 5.2.4) el peso de la masa suspendida que soportará cada eje.

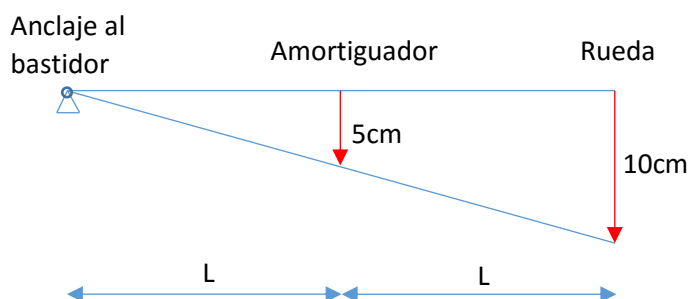
Según este reparto y la estimación de la masa suspendida realizada, los pesos por eje son los siguientes:

Eje delantero:  $250 \times 0.4 = 100kg$

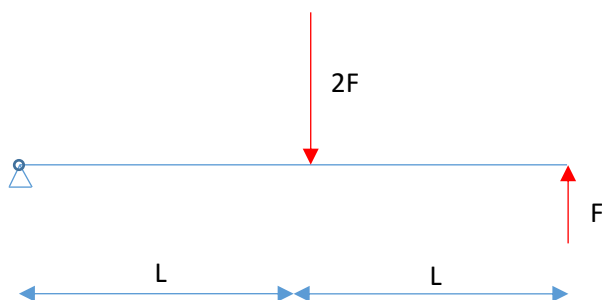
Eje trasero:  $250 \times 0.6 = 150kg$

Lo que hace que cada rueda delantera soporte 50kg de la masa suspendida y cada rueda trasera 75kg de la masa suspendida. Lo que esto no significa que sea la carga que deba soportar el amortiguador.

El siguiente paso es calcular la posición del amortiguador para saber qué carga soportará este. Tal y como se ha especificado en el apartado 5.2.4 de esta memoria, se desea tener un recorrido de la rueda de 10cm, lo que sería imposible si por ejemplo se colocará el amortiguador encima del eje rígido en el caso del eje trasero o muy cerca de la mangueta en el caso del eje delantero, ya que el amortiguador solo tiene un recorrido máximo de 5cm. Es por ello que si se desea que la rueda tenga 10 cm de recorrido es necesario que el amortiguador se situé en el medio de los brazos longitudinales en el caso del eje trasero y en el medio de los trapecios para el caso del eje delantero. Se puede ver en siguiente esquema una pequeña representación del recorrido del brazo.



Si aplicamos las condiciones de equilibrio mecánico al brazo longitudinal o al trapecio se puede ver que si la posición del amortiguador está en la mitad de la longitud, la carga que soporta es el doble que la de la rueda. A continuación se muestra el diagrama de cargas de la barra longitudinal o el trapecio.



$$\sum M_y = L \times 2F - 2L \times F = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

Por lo tanto cada amortiguador delantero soportará 100kg y cada amortiguador del eje trasero soportará 150kg.

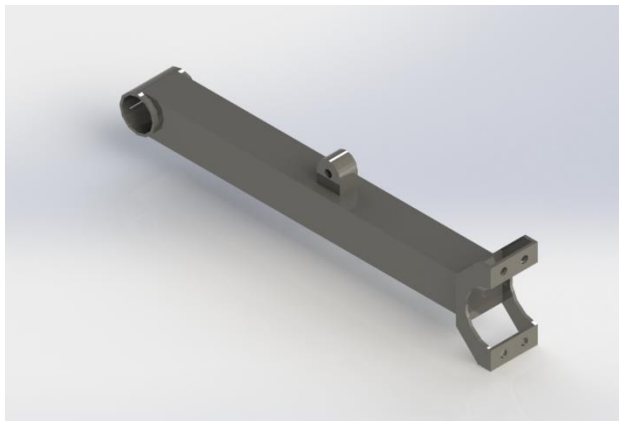
Conociendo las cargas se puede conocer lo comprimido que estará el amortiguador a través de la gráfica de caracterización del amortiguador anteriormente mostrada. Según estas cargas y la gráfica, los amortiguadores delanteros estarán 24mm comprimidos y los amortiguadores traseros 29mm. Es necesario saber este dato para poder realizar un modelo exacto del conjunto muelle/amortiguador y también para asegurar que la suspensión tendrá suficiente recorrido. Se ha comprobado que sí es así, ya que tanto los amortiguadores delanteros como los traseros están a la mitad de su recorrido en el estado de marcha.

### 7.3.2. Diseño del brazo longitudinal

Para el sistema de suspensión trasero de eje rígido es necesario diseñar los brazos longitudinales que sostengan el eje y que impidan sus movimientos longitudinales. Para ello el brazo debe tener una abrazadera para sujetar el eje en un lado y en el otro debe de tener una unión mediante un *silent block*. Este tipo de unión se utiliza para absorber vibraciones y para permitir cierto grado de rotación. En el caso del prototipo es necesario su utilización por la segunda razón, ya que es necesario permitir un poco de rotación en la unión con el bastidor, ya que al ser un ensamblaje rígido, si no se pusiera este tipo de unión, al levantarse una rueda por un bache, la otra también se levantaría. La unión mediante *silent block* consiste en un vástago rodeado de goma, la cual es la que se deforma elásticamente para permitir esta pequeña rotación de la articulación y para absorber las vibraciones que transmita el brazo longitudinal.

Para el diseño del brazo se ha utilizado tubo de acero de 40x40 y 2mm de espesor. Se ha escogido este tubo para aprovechar el que se utilizó en la base del bastidor y por sus buenos resultados en las simulaciones del bastidor.

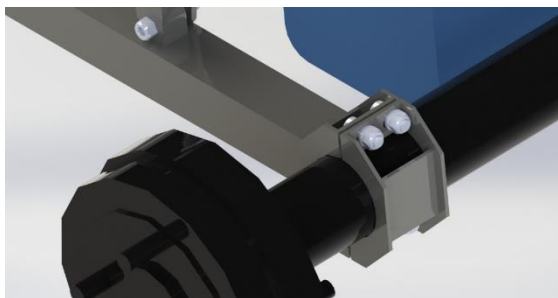
En la figura 68 se muestra el modelo que se ha realizado del brazo longitudinal.



*Figura 68. Modelo del brazo longitudinal*

La abrazadera del brazo longitudinal que sujeta el eje rígido se ha decidido hacerse mediante un ensamblaje de planchas de acero de 5mm de espesor cortadas con la máquina de corte por agua.

Se puede ver en la figura 69 una imagen del modelo de esta abrazadera sujetando al eje, y en la figura 70 una imagen de la abrazadera fabricada y sujetando al eje rígido.



*Figura 69. Modelo de la abrazadera*



*Figura 70. Abrazadera construida*

Los *Silent Block* se compraron en una tienda de repuestos genéricos para automóviles. Se encontraron unos de diámetro exterior de 34mm, lo que los hacían perfectos para los brazos longitudinales.

En la figura 71 se puede ver el modelo de todo el ensamblaje de la suspensión trasera. En la figura 72 se muestra la suspensión trasera construida y ensamblada.

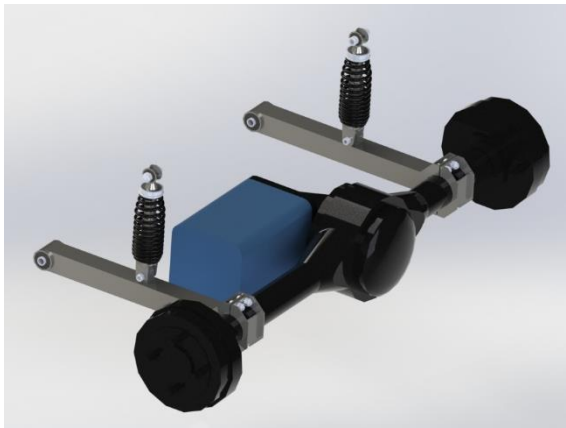


Figura 71. Modelo del ensamblaje

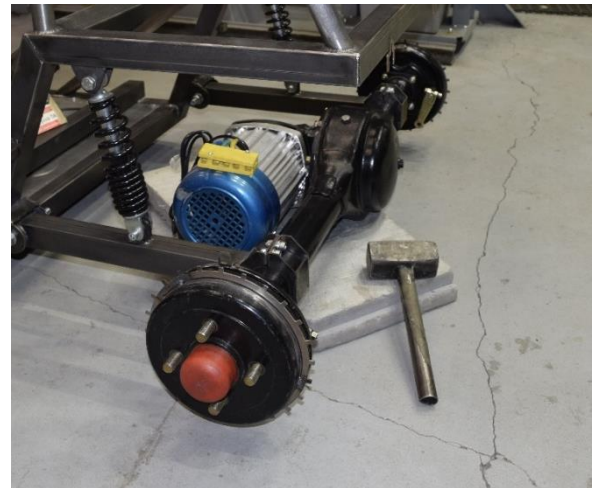


Figura 72. Suspensión trasera construida

#### 7.4. Diseño del sistema de suspensión del eje delantero del prototipo

A la hora de decidir qué tipo de suspensión utilizar para el eje delantero del prototipo ha habido varias razones de peso que han hecho que la mejor opción fuese la de dobles triángulos superpuestos.

En primer lugar se decidió que la suspensión del eje delantero fuese independiente, ya que sino el hecho de tener los dos ejes con suspensión dependiente haría que el coche no fuese cómodo de conducir. Eso limita las opciones a tres: dobles triángulos superpuestos, McPherson y Multilink.

La suspensión Multilink se descartó debido a que no se tenía ni experiencia ni tiempo de diseñar y construir una suspensión Multilink que funcionara bien. También se valoró que las ventajas que aporta esta suspensión no afectarían al prototipo debido a que es un vehículo de baja velocidad y este tipo de suspensión está pensado para vehículos de altas prestaciones.

Finalmente se eliminó la opción de la McPherson debido a que el conjunto muelle/amortiguador del que se disponía no era apto para funcionar como pivote estructural McPherson. También influyó el hecho de que la suspensión McPherson requiere de un punto de apoyo estructural en el bastidor para el pivote McPherson, el cual es necesario que esté en un punto muy elevado y exterior, aproximadamente situado sobre la mangueta. Ese hecho habría hecho que el morro del bastidor fuese muy ancho y alto, algo que no interesaba.

Por todos estos motivos se escogió la suspensión de dobles triángulos superpuestos. No solo es mejor que el resto de opciones, sino que permite realizar un estudio exhaustivo de la suspensión y conocer la configuración exacta de todos los elementos de la suspensión y de la rueda.

#### 7.4.1. Manguetas

Otro de los componentes de los cuales no ha habido opción de escoger ha sido el conjunto de la mangueta, el buje y el disco y la pinza de freno. En este caso no ha sido porque ya estuvieran comprados sino porque una de las condiciones que se impusieron para abaratar costes y reducir tiempo de fabricación y diseño era utilizar estos componentes, así como también la cremallera de dirección del vehículo Iguana EVO 2 del equipo de Formula Student FDR Mami (ver figura 73).



*Figura 73. Iguana EVO 2*

Diseñar unas manguetas es bastante complejo y requiere muchas horas de mecanizado de la fresadora CNC para fabricarse. Si añadimos el hecho de que estas manguetas ya han sido rodadas y se sabe que funcionan bien hace que el hecho de reutilizarlas fuera más que beneficioso.

En la Figura 74 se muestra el modelo de las manguetas en cuestión, junto al buje, el disco y la pinza de freno y en la figura 75 se muestra una foto de la mangueta real.



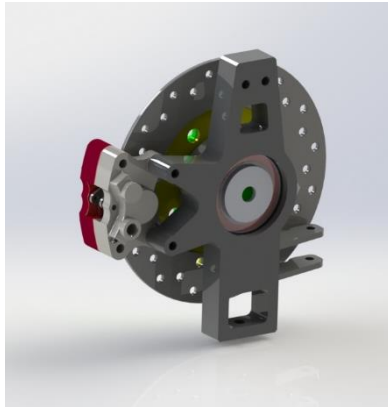


Figura 74. Modelo de la mangueta



Figura 75. Mangueta real

#### 7.4.2. Estudio de la cinemática de la suspensión

Diseñar unos trapecios de suspensión que hagan funcionar la suspensión de forma correcta es una tarea meticulosa que requiere de diversas iteraciones hasta encontrar la geometría deseada y el croquis frontal de los trapecios de suspensión.

Para el caso de la suspensión delantera del prototipo fue necesario realizar muchos diseños, pero en este apartado se mostrará solo el último diseño de la geometría de la suspensión que es la que se ha empleado en los trapecios del prototipo que finalmente se ha construido.

Antes de diseñar el modelo de los componentes de la suspensión es necesario diseñar la suspensión en alámbrico en un croquis 2D, estudiar la cinemática que tendría y asegurar que esta sea correcta a lo largo de todo el recorrido. Para ello es necesario primero situar el eje de las ruedas según los parámetros de la batalla, ancho de vía y altura sobre el suelo definidos en los apartados 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3, y sabiendo que la altura del centro de la mangueta debe estar a 250mm sobre el suelo, ya que las ruedas delanteras que se van a utilizar tienen 500mm de diámetro. Estas también proceden del monoplaza Iguana EVO2. Una vez se ha realizado esto, se ha situado en el modelo las manguetas y se han posicionado con los parámetros de camber, caster y ángulo de convergencia especificados en los apartados 7.1.2, 7.1.6 y 7.1.10 de esta memoria.

Con el modelo en el estado anteriormente descrito, se crea un croquis 2D en el plano vertical que pasa por el eje delantero de las ruedas. En este croquis se crea el diseño de la vista frontal de los trapecios de suspensión. Este proceso es un proceso iterativo en el que para cada diseño hay que chequear donde se encuentra el centro instantáneo de rotación y el centro de balanceo. Si no se encuentran en el punto deseado hay que diseñar de nuevo este croquis. En la figura 76 se muestra las líneas que debe contener este croquis desde la vista frontal del vehículo, el CIR de la suspensión



de la izquierda del vehículo (el de la rueda derecha es simétrico respecto al plano longitudinal del vehículo y no es necesario calcularlo), y el centro de balanceo  $R_o$ .

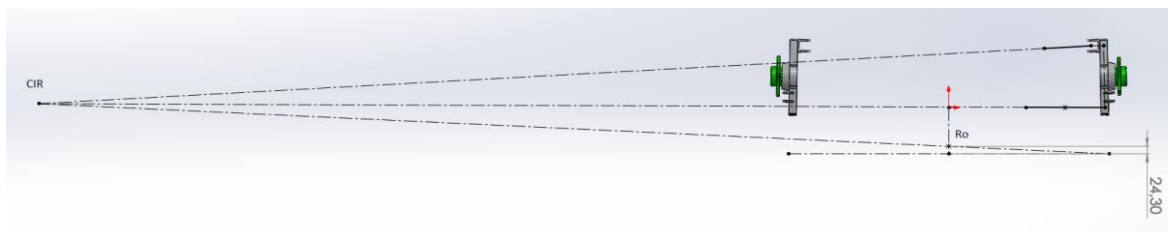


Figura 76. Cálculo del CIR y  $R_o$

Una vez se tenga un croquis que consideremos válido, es necesario incorporar a la geometría del croquis la línea central del amortiguador y de la mangueta, y comprobar como varían los valores del camber según el recorrido del amortiguador, es decir, según cambiamos la longitud de la línea central del amortiguador. En la figura 77 se puede ver este croquis para el estado de máximo estiramiento del amortiguador (0mm comprimido), en la figura 78 para el estado de orden de marcha (24mm comprimido) y en la figura 79 para el estado de máxima compresión (50mm comprimido). Los valores del camber que aparecen son de signo negativo, ya que la parte superior de la rueda queda más cerca del vehículo.

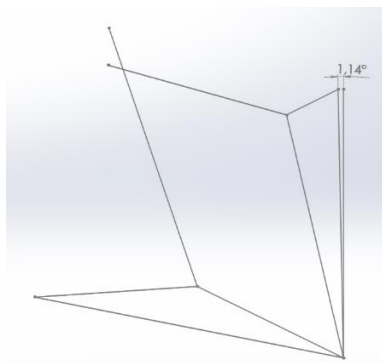


Figura 77. 0mm comprimido

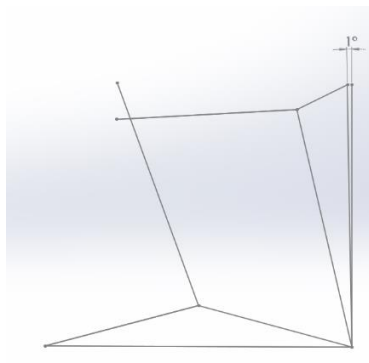


Figura 78. 24mm comprimido

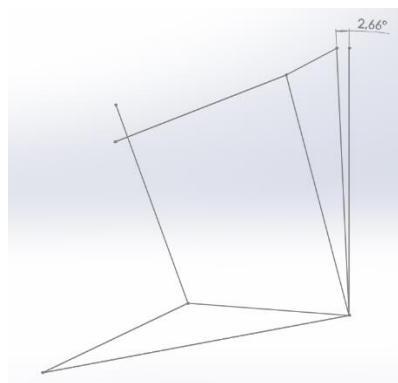
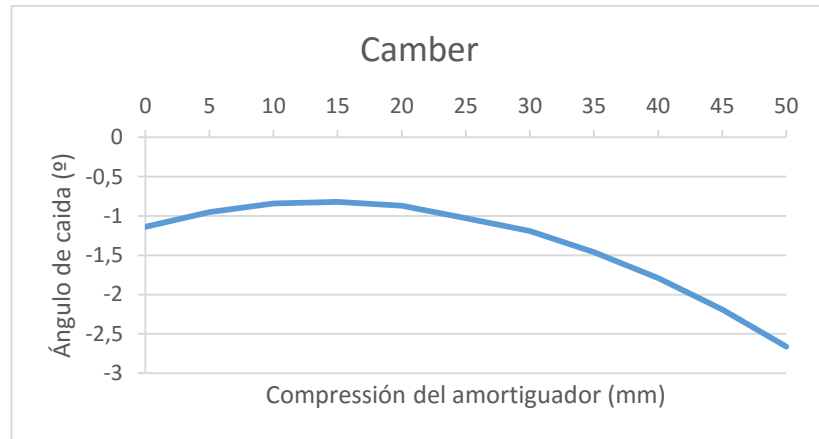
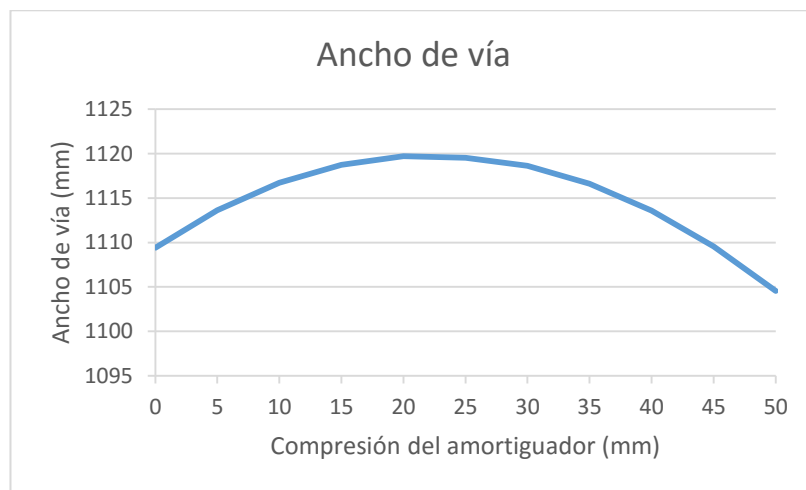


Figura 79. 50mm comprimido

En las figuras se puede ver como el camber se mantiene dentro de los valores especificados en el apartado 7.1.2. En la gráfica 2 se puede observar los valores que adquiere el camber para más puntos del recorrido del amortiguador. También en la gráfica 3 se puede ver la variación del ancho de vía según el recorrido de la suspensión.



Gráfica 2. Variación del camber según la compresión del amortiguador



Gráfica 3. Variación del ancho de vía según la compresión del amortiguador

Para finalizar el estudio cinemático y poder concluir que la geometría escogida funcionará bien una vez construida, es necesario chequear en qué punto debe estar la unión entre la cremallera de dirección y el *tie rod* (nombre en inglés de la barra que une la cremallera de dirección y la mangueta), ya que el *tie rod*, al igual que los trapecios, se mueve verticalmente según el recorrido de la suspensión (se hablará más detalladamente de este componente en el apartado 8 de esta memoria). Para que el *tie rod* se mueva junto con los trapecios de manera suave y permitiendo el funcionamiento de la suspensión, es necesario que tenga el mismo CIR que los trapecios y que el punto de unión entre la cremallera (parte fija al bastidor) y el *tie rod* esté en un punto concreto. En la figura 80 se muestra como se calcula gráficamente este punto.

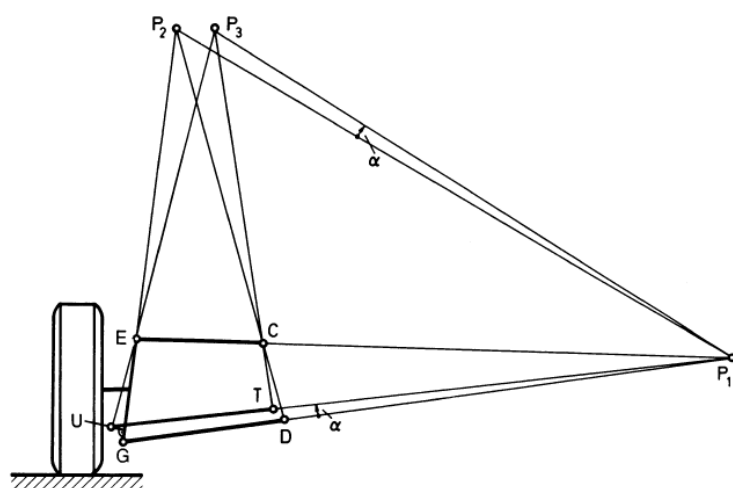


Figura 80. Cálculo del punto T teórico

En la figura 81 y en la figura 82 se muestra este cálculo para la geometría utilizada en el prototipo.

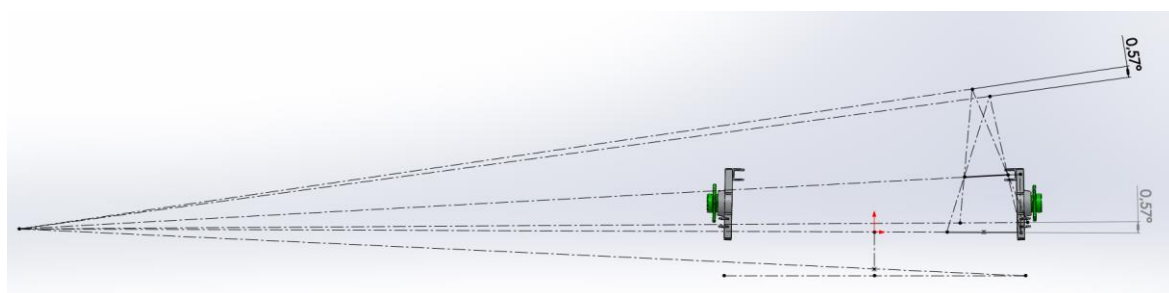


Figura 81. Cálculo del punto T

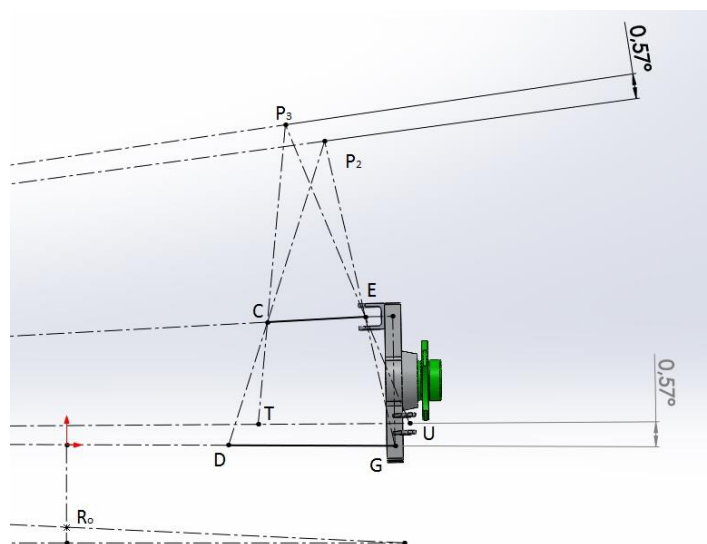


Figura 82. Detalle del cálculo del punto T

Si el punto de unión entre el *tie rod* y la cremallera de dirección (el punto T en la figura 82) está en una posición factible, es decir, una posición en la que se pueda situar la cremallera de dirección y no interfiera con ningún elemento del vehículo, entonces se puede concluir que la geometría diseñada para los trapecios es correcta y que la suspensión tendrá una buena cinemática, por lo que ya se puede empezar a modelar el modelo 3D de los trapecios.

#### 7.4.3. Articulaciones de los trapecios

Antes de empezar el diseño de los trapecios es necesario decidir cómo serán las uniones entre trapecio y mangueta, y entre trapecio y bastidor.

Para las 2 uniones que tiene cada trapecio con el bastidor, la única solución es utilizar un *Rod end*.

Este componente es muy caro, ya que un Rod end de métrica 8 cuesta unos 35€, dependiendo de la marca. Por lo que se decidió reutilizar los rod ends de un vehículo prototipo que se construyó en el 2014 en las instalaciones del Formula Student de MAMI y que estaba en desuso. Los rod ends que se han utilizado son métrica 8 para los trapecios superiores y métrica 10 para los inferiores, y son de la compañía Aurora Bearing Company.

En la figura 83 se muestra una imagen de este componente.



Figura 83. Rod end

Para la unión entre el trapecio y la mangueta existen dos opciones: utilizar un *rod end* o utilizar un cojinete esférico plano (conocido también como *spherical bearing*). Se ha decidido utilizar cojinetes esféricos planos, ya que es la opción más común y no se transmite la carga del trapecio a la rueda a través de un solo vástago como en el caso del rod end, aunque se han estudiado las dos opciones, llegándose incluso a modelar una versión del trapecio inferior con rod end (la versión 5 del trapecio inferior, la cual se muestra en el apartado 2.5 del Anexo).

Se ha estudiado los modelos de la compañía Aurora Bearing Company (ver bibliografía [4]) y también de la compañía SKF (ver bibliografía [3]), ya que ambas compañías podían servir este tipo

de componente en Moscú. Al final se ha decidido utilizar los de la compañía SKF por motivo económico, ya que estos costaban 4 veces menos que los de Aurora Bearing Company.

Se compraron dos cojinetes esféricos del modelo GE 8C para los trapecios superiores y dos GE 10C para los trapecios inferiores. Se muestran las especificaciones técnicas de ambos componentes en el apartado 3 del Anexo. En la figura 84 se muestra el modelo SKF GE 8C.



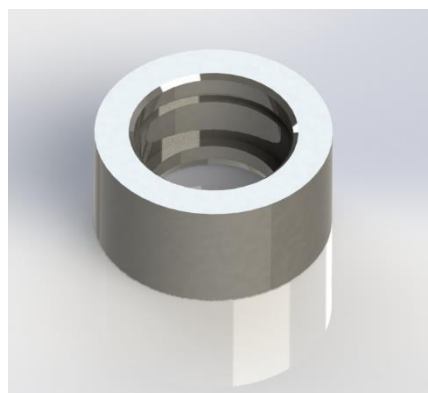
*Figura 84. SKF GE 8 C*

#### **7.4.4. Alojamiento de los cojinetes esféricos de los trapecios**

Como se ha comentado en el apartado 7.4.3, se ha decidido que la articulación entre los trapecios y la mangueta sea con los cojinetes esféricos de SKF mencionados. Estos cojinetes deben ir sujetos en un alojamiento y retenidos en este alojamiento por un anillo retenedor.

Al ser el cojinete esférico un componente tan pequeño y a través del cual se transmiten las cargas, es muy importante que el alojamiento este diseñado con la tolerancia de los planos, por lo que se realizaron con el torno CNC del cual dispone el laboratorio del Formula Student MAMI.

En la figura 85 se puede ver el modelo 3D del alojamiento para el trapecio superior. El alojamiento del trapecio inferior es similar a este pero un poco más grande. Los planos de ambas piezas se encuentran en los apartados 4 y 5 del Anexo.



*Figura 85. Alojamiento dl cojinete esférico del trapecio superior*

#### 7.4.5. Diseño de los trapecios de la suspensión

Una vez hecha la geometría de la vista frontal de la suspensión (apartado 7.4.2), es necesario hacer un croquis 3D que tenga la misma geometría observada desde la vista frontal. En la figura 86 se muestra el diseño realizado.

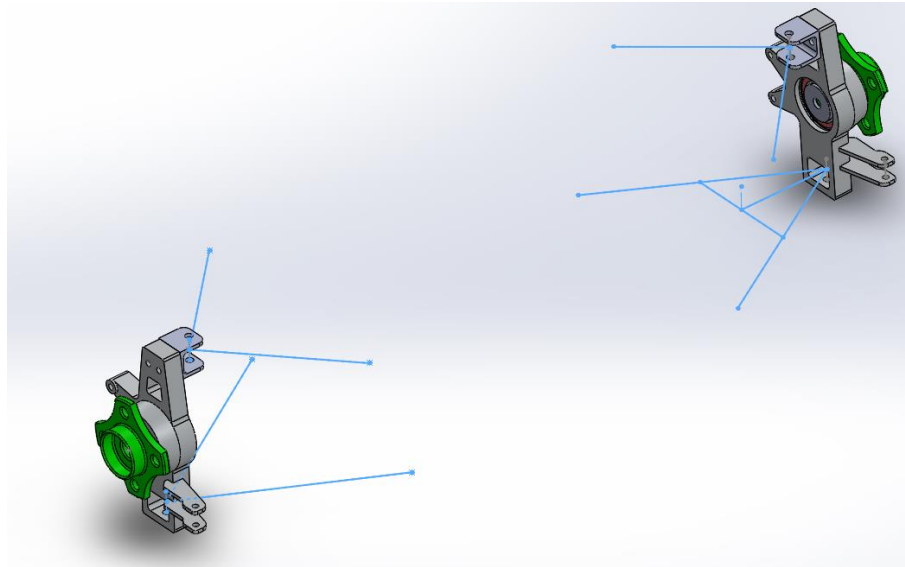


Figura 86. Diseño de la geometría

Se ha decidido que la distancia entre los dos puntos de unión con el bastidor de cada trapecio sea de 30cm. Con este croquis 3D ya se puede empezar a modelar los trapecios.

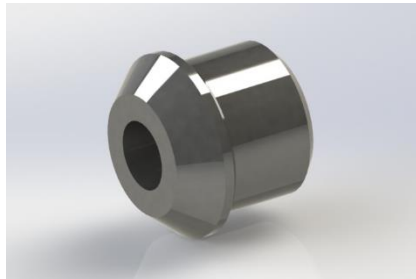
En el laboratorio del Formula Student MAMI se disponía de tubos de acero de diámetro exterior 20mm y 18mm, ambos tipos de tubos con espesor de 1,5mm, por lo que se decidió realizar el trapecio superior con el tubo de diámetro exterior de 18mm y el trapecio inferior con el tubo de diámetro exterior de 20mm, ya que este tiene que soportar las cargas del amortiguador.

El proceso de diseño de los trapecios ha sido un proceso de continuo aprendizaje, ya que para cada modelo que se realizaba del trapecio, aparecía un nuevo problema que había que tener en cuenta. Tanto es así, que se han llegado a hacer 6 versiones del trapecio inferior y 2 del superior. Para simplificar la memoria solo se hablará de las versiones finales de ambos trapecios, y en el apartado 1 y 2 del Anexo se incluirán imágenes de los modelos descartados.

- **Trapecio superior**

Se compone de dos tubos de diámetro exterior 18mm, el alojamiento del cojinete esférico y dos piezas que forman el final del trapecio, en las cuales se enroscan los rod ends.

En la figura 87 se muestra el modelo 3D de las piezas para enroscar los rod ends. Estas piezas también se han hecho en el torno CNC de las instalaciones del Formula Student MAMI. Los planos de esta pieza se encuentran en el apartado 7 del Anexo.



*Figura 87. Pieza para enroscar los Rod ends en los trapecios*

En la figura 88 se muestra el modelo del trapecio superior.



*Figura 88. Modelo del trapecio superior*

La unión entre los tubos y el alojamiento del cojinete esférico se realiza con soldadura, pero previamente hay que prensar los tubos hasta que adquieran la altura del alojamiento, de tal forma que todo el contorno del tubo se pueda soldar al alojamiento. En el modelo se muestran los tubos sin prensar.

En la figura 89 se muestran los trapecios superiores finalmente contruidos junto con los tie rods (se hablará sobre estos componentes en el apartado 8). En la figura 90 se muestra el trapecio superior ensamblado en la suspensión.



Figura 89. Trapecios superiores y tie rods fabricados



Figura 90. Trapecio superior ensamblado

- Trapecio inferior

El trapecio inferior es un poco más complejo que el superior, ya que en él se soporta el amortiguador. El trapecio inferior se compone de tres tubos de 20mm de diámetro exterior, el alojamiento del cojinete esférico, los dos alojamientos para enroscar los rod ends, pero además también se compone de dos piezas hechas de plancha de acero de 2 milímetros de espesor, las cuales sostienen la montura del amortiguador. La montura del amortiguador se compone por dos piezas hechas de plancha de acero de 4mm y entre estas dos planchas se intercala un tubo de acero de diámetro exterior de 18mm, espesor de 1,5mm y 12mm de largo.

En la figura 91 se muestra el modelo del trapecio inferior.



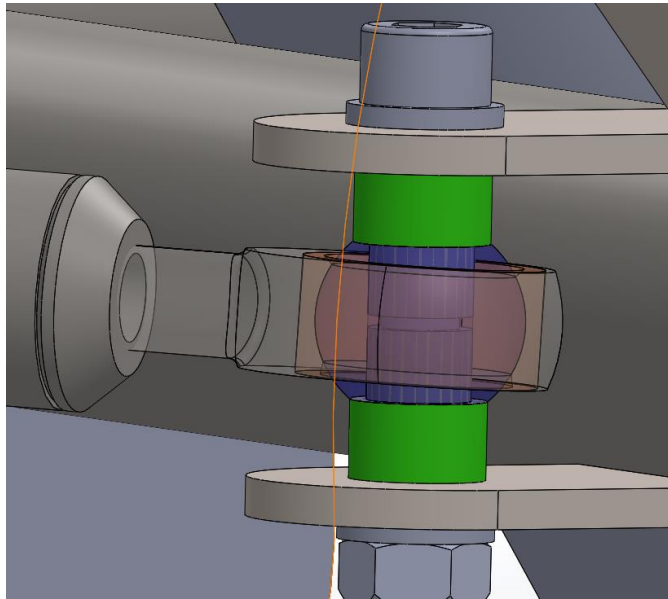
Figura 91. Modelo del trapecio inferior



#### 7.4.6. Bushings

Para que las articulaciones (rod ends y cojinetes esféricos) no tengan movimiento vertical dentro de su alojamiento o de su montura es necesario crear unas piezas denominadas bushings. Cada articulación tiene un bushing en la parte superior y otro en la inferior.

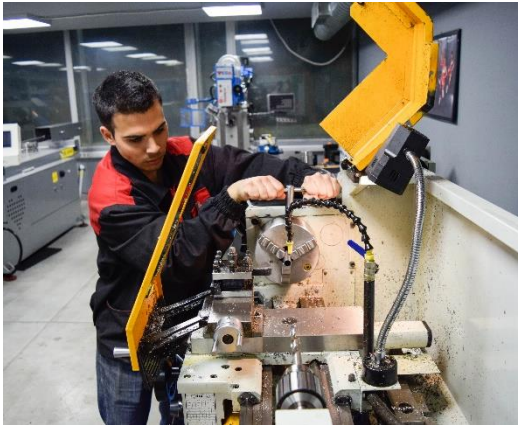
En la figura 92 se puede ver los bushings en verde que bloquean el Rod end del trapecio superior.



*Figura 92. Modelo de los bushings*

Para producir este tipo de piezas ha sido necesario aprender a utilizar el torno convencional. Ha sido una tarea laboriosa realizar los 32 bushings que se necesitaban entre las articulaciones de la suspensión y la de los tie rods de la dirección, ya que requieren de gran precisión. Aunque sean piezas pequeñas, requieren de una precisión de 0,1mm para que la fijación del cojinete sea buena, por lo que se ha requerido un promedio de media hora para producir cada pieza.

En la figura 93 y 94 se muestra la producción de los bushings.



*Figura 93. Fabricación con el torno convencional de los bushings*



*Figura 94. Bushings fabricados*

#### 7.4.7. Diseño completo de la suspensión frontal

Una vez se han modelado todos los componentes se realiza el modelo de la suspensión completa. En la figura 95 se muestra el modelo de la suspensión delantera finalmente construida para el vehículo autónomo.



*Figura 95. Modelo de la suspensión delantera*

En la figura 96 se muestra una fotografía del sistema de suspensión del lado izquierdo finalmente construido y ensamblado en el prototipo.



*Figura 96. Suspensión delantera ensamblada*

## 8. DIRECCIÓN

Debido a las necesidades que tiene el vehículo autónomo, diseñar y construir el sistema de dirección no ha sido una tarea sencilla.

Al ser autónomo el coche tiene que poder mover la dirección simplemente siguiendo las órdenes de un ordenador, lo que hace que la dirección requiera de un motor eléctrico para poder girar las ruedas. Pero la verdadera dificultad reside en que se ha querido que el coche se pueda conducir de forma autónoma pero también que un piloto lo conduzca, es decir, que el coche tenga un modo “manual” y un modo “automático”. Este hecho hace que se requiera un sistema que haga que el movimiento de las ruedas se produzca por el motor eléctrico o por el volante.

### 8.1. Cremallera de dirección y tie rods

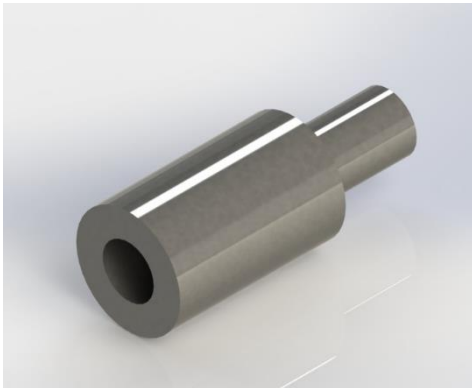
Anteriormente ya se ha mencionado el hecho de que se ha reutilizado la cremallera de dirección del vehículo Iguana EVO2 del equipo de Formula Student de MAMI. En la figura 97 se muestra el modelo que se ha creado de esta cremallera de dirección.



*Figura 97. Modelo de la cremallera de dirección*

Tal y como se ha explicado en el apartado 7.4.2, para que funcione bien la suspensión delantera es necesario que la unión entre la cremallera de dirección del coche y el tie rod esté en el punto calculado en dicho apartado. El problema es que la distancia entre el punto de unión del lado izquierdo y el punto de unión del lado derecho es más grande que la longitud que puede alcanzar la cremallera de dirección del vehículo Iguana EVO 2. Por ello fue necesario crear con el torno dos separadores (uno para cada lado de la cremallera) para conseguir que la longitud total de la cremallera aumentara. En la figura 98 se muestra el modelo de este separador, en la figura 99 una

imagen de la pieza real ensamblada y en el apartado 8 del Anexo se encuentra el plano de esta pieza.



*Figura 98. Modelo del separador*



*Figura 99. Separador construido y enroscado en la cremallera de dirección*

Una vez situada la cremallera de dirección con sus extremos en los puntos mencionados en el apartado 7.4.2, es necesario unir la cremallera con las manguetas. Para ello se utilizan los tie rods. Se trata de un tubo con rod ends en sus extremos que se mueve con el movimiento de los trapecios de suspensión. Su función es transmitir el movimiento transversal de la cremallera de dirección a la mangueta y por lo tanto hacer girar la rueda sin importar el punto del recorrido de la suspensión en el que se encuentre la mangueta.

En la figura 100 se muestra el modelo de la cremallera de dirección con los tie rods.

Los tie rods se han diseñado del mismo tubo de acero que los trapecios superiores de la suspensión, es decir de 18mm de diámetro externo y de 15mm de diámetro interno.



*Figura 100. Modelo de la cremallera de dirección con los tie rods ensamblados*

## 8.2. Columna de dirección

Una vez se tiene el ensamblaje de la cremallera de dirección y de los tie rods diseñado es necesario diseñar la columna de dirección.

Para la columna de la dirección se han reutilizado dos juntas de cardán del vehículo Iguana EVO 2. Estas juntas de cardán tienen un diámetro interno para la columna de dirección de 19mm, ya que la columna de dirección original del Iguana EVO 2 es de tubo macizo de 19mm de diámetro.

Para diseñar la posición y forma de la columna de dirección es necesario realizar previamente un estudio ergonómico para decidir su trayectoria. No solo hay que tener en cuenta que el volante este en una posición cómoda para el conductor, sino que hay que tener en cuenta que la junta de cardán trabaja bien hasta un ángulo máximo de  $18^\circ$  y que no puede trabajar de ninguna manera con ángulos superiores a  $24^\circ$ .

En la figura 101 se muestra la posición de la columna de dirección finalmente diseñada y construida.

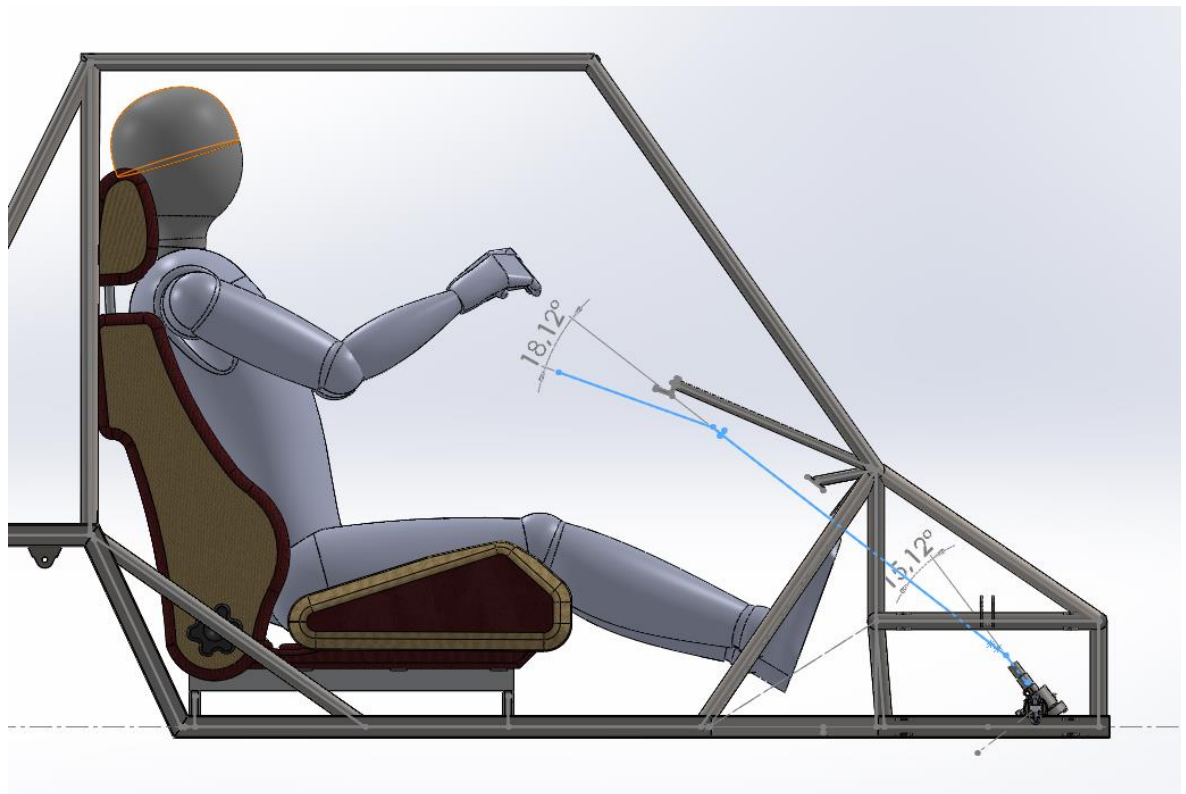


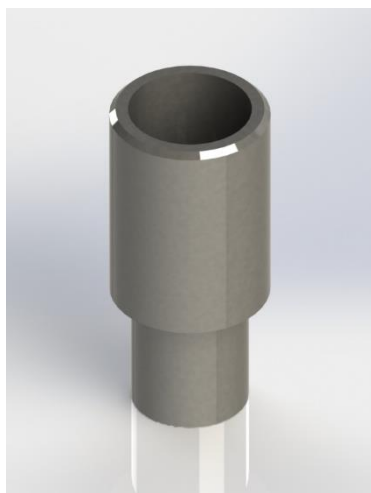
Figura 101. Posición de la columna de dirección

Una vez decidida la trayectoria de la columna es necesario decidir cómo serán los componentes que la forman. En primer lugar es necesario decidir cómo serán los dos tramos de la columna. Lo



lógico sería que teniendo dos juntas para tubo de 19mm se utilizara tubo de 19mm. El problema fue que no se disponía de secciones de tubo de 19mm tan largas como para hacer el primer tramo de la columna, el cual tiene una longitud de 628mm, y tampoco había la opción de comprarlo, ya que hacer un pedido, el cual normalmente no te venden menos de 6m, para tan solo aprovecharlo para ese tramo de la columna hubiese encarecido mucho el proyecto. En vez de eso se aprovecharon las habilidades con el torno recientemente adquiridas en este proyecto y se fabricaron unos adaptadores. Estos adaptadores por un lado tienen un eje macizo de 19mm y por el otro tienen un agujero interior de 20mm de diámetro.

En la figura 102 se puede ver el modelo de esta pieza. Los planos de esta pieza se pueden encontrar en el apartado 9 del Anexo.



*Figura 102. Modelo del adaptador*

De este modo, el primer tramo de la columna se ha podido diseñar del mismo tubo de 20mm de diámetro que los trapecios de suspensión inferior, y el segundo tramo de tubo macizo de diámetro exterior de 19mm, ya que este tramo mide solo 184mm y sí que había secciones de esta longitud. También era interesante utilizar tubo de 19 por lo menos en un tramo de la columna, ya que de esta manera se podía reutilizar el soporte de la columna original del Iguana EVO 2 para este tramo.

En cuanto al volante se ha comprado un volante genérico sencillo. Para adaptar el volante a la columna de dirección ha sido necesario diseñar y producir un adaptador a partir de planchas de 2 y 4 mm de acero. El adaptador diseñado se muestra en la figura 103, con los respectivos espesores de acero.

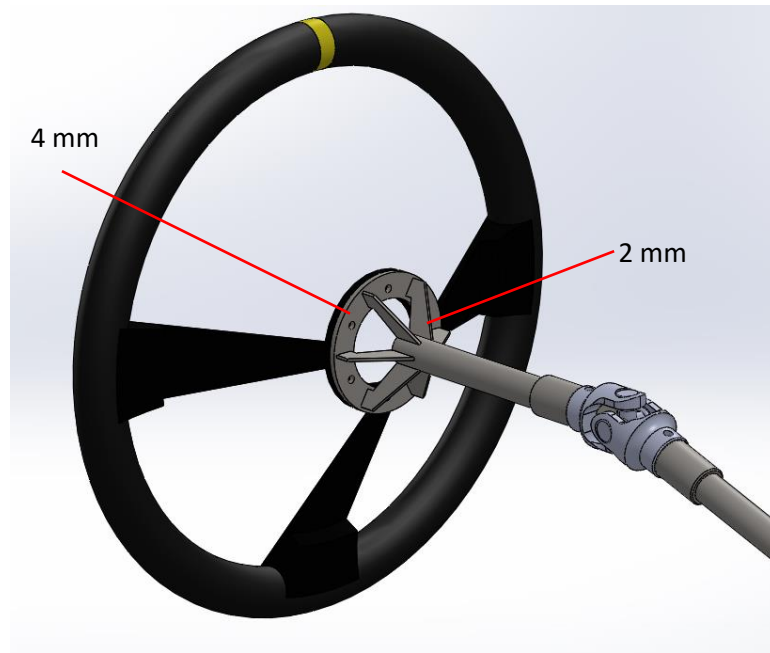


Figura 103. Modelo del adaptador del volante

En la figura 104 se muestra la columna de dirección diseñada.



Figura 104. Modelo de la columna de dirección

### 8.3. Cálculo del radio mínimo de giro.

Para conseguir el radio mínimo deseado de 4m especificado en el apartado 5.2.4 hay que hacer un estudio de cuanto es necesario que giren las manguetas y de cuanto se tiene que desplazar la cremallera de dirección desde el punto neutro para tener ese radio de giro.

Para ello se ha estudiado la vista superior de la geometría del vehículo y se ha comprobado el ángulo que necesitan estar giradas para un radio de giro de 4m. En la figura 105 se muestra este estudio.



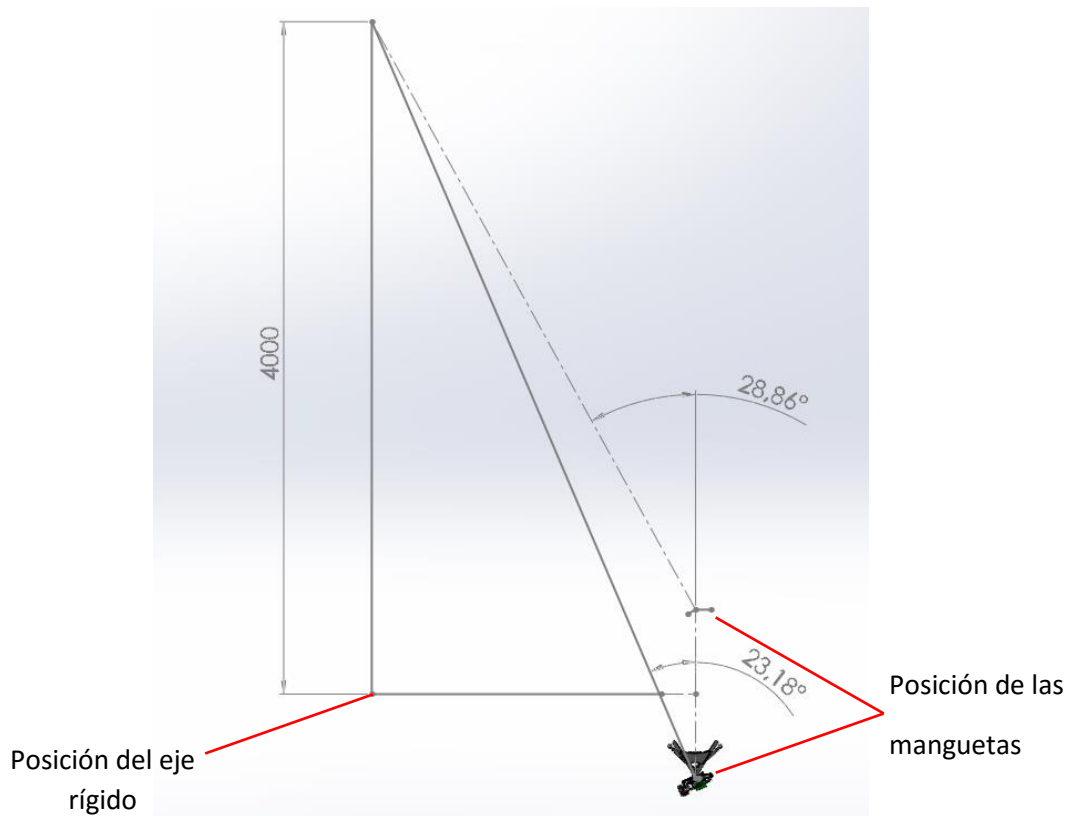


Figura 105. Estudio realizado con el radio de giro

Según el estudio realizado se muestra que el ángulo de la mangueta más cerrada al girar con un radio de 4m es de  $28,86^\circ$ . Es un buen dato ya que los trapecios de suspensión diseñados en el apartado 7 permiten un giro máximo de la mangueta sin que haya contacto con el trapecio de  $31^\circ$ .

Para saber cuánto es necesario desplazar la cremallera de dirección para girar  $29^\circ$  la mangueta, se ha realizado un modelo alámbrico de todo el conjunto de suspensión y dirección (figura 106).

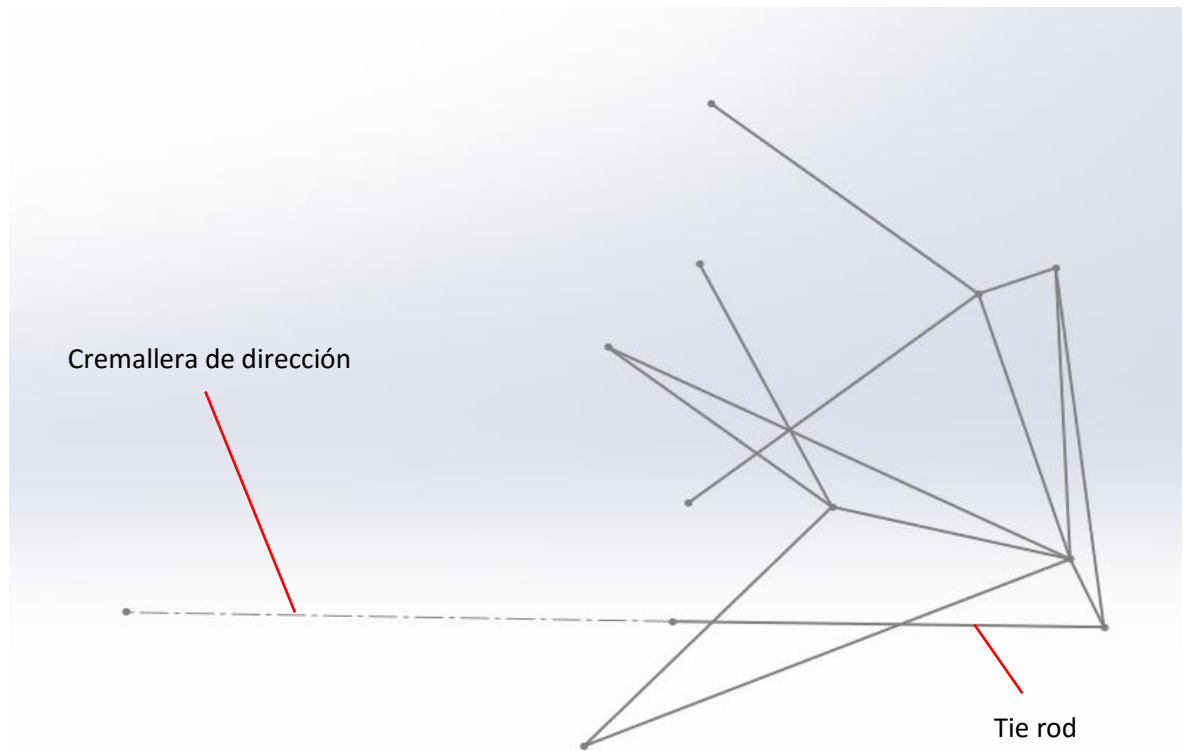


Figura 106. Modelo alámbrico de la suspensión y de la dirección

A través de este modelo se observó que para que la mangueta gire  $29^\circ$  la cremallera se debe desplazar 4cm.

Una vez obtenido este dato es necesario saber cuánto debe de girar la columna de dirección para hacer el recorrido completo de la dirección y desplazar la corredera 8cm, es decir, desde la posición en que las ruedas están giradas al máximo a la izquierda hasta la posición en que las ruedas están giradas al máximo a la derecha. Para obtener este dato simplemente se ha hecho el test con la cremallera para ver cuánto giraba el vástago que se conecta a la columna al desplazar la corredera 8cm. El resultado es que necesita girar  $440^\circ$ , es decir, que hace el recorrido completo de la dirección en aproximadamente una vuelta y cuarto de volante.

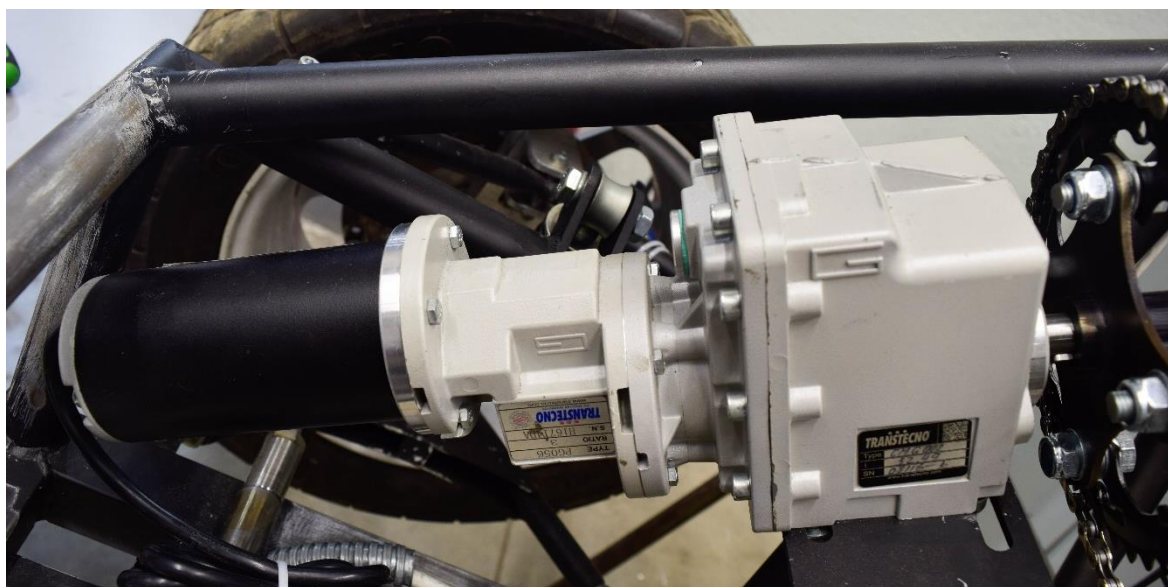
Este dato será muy importante para calcular la relación de transmisión necesaria con el motor.

#### 8.4. Motor eléctrico de la dirección

Para mover la dirección en el modo autónomo es necesario utilizar un motor eléctrico. Tal y como se ha mencionado anteriormente, este componente ya estaba comprado en el momento en que se llegó a Moscú. Se trata de un motor de corriente continua alimentado a 12V y que da 100W de potencia. El sistema de control que lleva incorporado le permite girar un recorrido máximo de  $270^\circ$ .

El reto de diseño que ha aportado este motor ha sido decidir en qué ubicación de la parte frontal del vehículo situarlo, diseñar una sujeción lo suficientemente rígida como para sostener sus 15kg de peso y que el motor no se moviera con las vibraciones de la conducción, y diseñar un sistema de transmisión para transmitir el par del motor hasta la columna de dirección.

Se puede ver el motor ensamblado en el prototipo en la figura 107.



*Figura 107. Motor de la dirección*

En cuanto a la posición del motor, uno de los requisitos es que el eje motriz del motor esté en posición paralela a la columna de dirección para poder transmitir sin problemas y de la manera más fácil posible el movimiento.

Teniendo en cuenta que cuanto más elevado estuviera el motor más alto quedaría el centro de gravedad, la premisa para ubicar el motor ha sido ubicarlo en la zona más baja posible de la columna de dirección. Se han aprovechado los tubos que soportan la montura del amortiguador y los trapecios superiores de la suspensión frontal para ubicar en ellos el soporte del motor.

El soporte que se ha diseñado se compone de cuatro partes las cuales están fabricadas de plancha de acero de 5mm de grosor, ya que es necesario que este soporte sea bien rígido. En la figura 108 se puede ver el modelo del soporte. En la figura 109 se muestra el ensamblaje del soporte construido y soportando el motor.

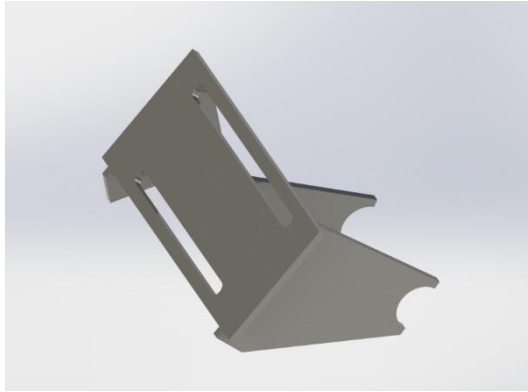


Figura 108. Modelo del soporte del motor de la dirección

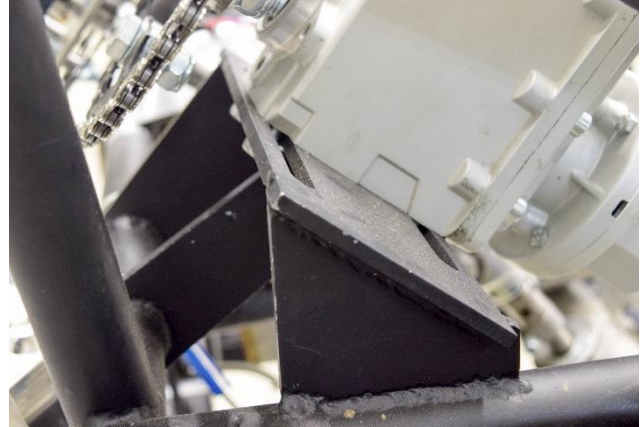


Figura 109. Soporte construido y soldado al bastidor del prototipo

### 8.5. Sistema de transmisión

Para mover la columna de dirección con el motor eléctrico ha sido necesario diseñar un sistema de transmisión que transmitiera el par del motor hasta la columna de dirección. Las dos opciones que se han barajado han sido utilizar transmisión por engranajes o transmisión por cadena.

En un primer momento se decidió utilizar transmisión por engranajes, ya que se consideró que la respuesta de la dirección sería más rápida y precisa que con cadena. Esta idea solo se mantuvo unas semanas ya que después de estudiar la idea se observó que era una opción bastante más cara que la cadena y que resultaba difícil encontrar un sitio en Moscú donde vendiesen un componente tan específico como una rueda dentada y que estuviera a tiempo para la presentación del prototipo.

Es por ello que se cambió la idea por la de transmisión por cadena. Para llevar a cabo esta opción solo ha sido necesario adquirir dos ruedas dentadas y una cadena de bicicleta. Estos componentes se adquirieron fácilmente en una tienda de bicicletas de Moscú.

Para decidir qué ruedas dentadas escoger ha sido necesario calcular la relación de transmisión necesaria. Se sabe que la columna de dirección debe girar un recorrido total de  $440^\circ$  y también se sabe que el motor puede girar  $270^\circ$  como máximo. Sabiendo esto se ha calculado la relación de transmisión a partir de la siguiente ecuación:

$$Z_m n_m = Z_c n_c \quad (\text{Ec. 3})$$

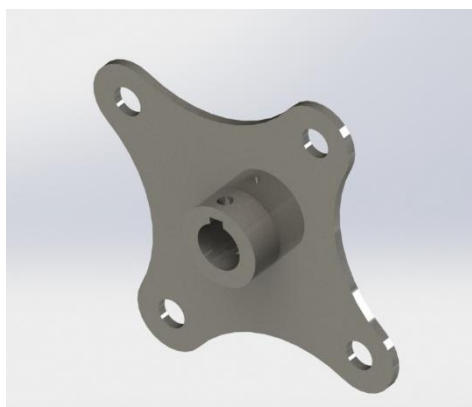
Siendo  $Z_m$  el número de dientes de la rueda dentada del motor,  $Z_c$  la rueda dentada de la columna de dirección,  $n_m$  los grados que necesita girar el motor y  $n_c$  los grados que necesita girar la columna de dirección. Por lo que la ecuación 3 queda de la siguiente manera:

$$\frac{Z_m}{Z_c} = \frac{440}{270} = 1,63$$

$$Z_m = 1,63Z_c$$

Por lo que la rueda dentada del eje del motor eléctrico debe tener 1,63 veces los dientes que la rueda dentada de la columna. Mirando las opciones en el mercado se ha decidido utilizar una rueda dentada de bicicleta de 26 dientes para la columna de dirección, por lo que teóricamente se necesitaría una rueda con 42,38 dientes para el eje del motor. Evidentemente esto no es posible ya que debe tener un número entero de dientes, por ello se adquirió simplemente una rueda dentada de 42 dientes para el eje del motor eléctrico.

Para acoplar la rueda dentada de 42 dientes al motor se ha creado un adaptador formado por dos piezas. La pieza que conecta directamente con el eje del motor se ha creado con el torno y con la fresa se le ha hecho la ranura interna para la chaveta del motor, y la pieza que conecta con la rueda dentada se ha hecho por corte de agua. En la figura 110 se muestra el modelo de este adaptador y en la figura 111 se muestra el adaptador fabricado y ensamblado.



*Figura 110. Modelo del adaptador*



*Figura 111. Adaptador construido*

## 8.6. Sistema de acoplamiento/desacoplamiento del motor

Tal y como se ha mencionado anteriormente, se requiere que el vehículo disponga de dos modos de conducción: uno autónomo, en el cual se conduce el coche completamente mediante el ordenador, y otro manual, en el cual el coche se conduce como un coche eléctrico normal a través del piloto.

Realizar este cambio de modo de conducción en el motor eléctrico del eje trasero no es una tarea difícil, ya que simplemente hay que cambiar entre que la señal que le llega al controlador del motor

provena del pedal electrónico del acelerador (en modo manual) o que provenga del computador (en modo autónomo).

En cambio, para realizar este cambio de modo de conducción en el sistema de la dirección, no es una tarea tan fácil. El problema reside en que el motor eléctrico de la dirección no se puede quedar acoplado a la columna de dirección permanentemente, ya que cuando este no está funcionando, es decir en modo manual, su eje motriz se queda bloqueado o con una resistencia muy alta al giro, por lo que si se quedara acoplado a la columna de la dirección en modo manual este bloquearía o dificultaría mucho el poder girar la dirección a través del volante, con el inconveniente añadido de que forzar el eje motriz del motor podría dañar el motor en sí y el sistema reductor que incorpora.

Es por ello que ha sido necesario diseñar un sistema de acoplamiento y desacoplamiento del motor. Este mecanismo no ha sido tarea fácil de diseñar y fabricar debido a la complejidad de la tarea que debe realizar.

En un principio, cuando se tenía la idea de utilizar engranajes para la transmisión, se tenía pensado realizar un mecanismo que desplazara una de las dos ruedas dentadas sobre su eje axial y que de esta manera desengranara la transmisión. La figura 112 ilustra el funcionamiento de este mecanismo.

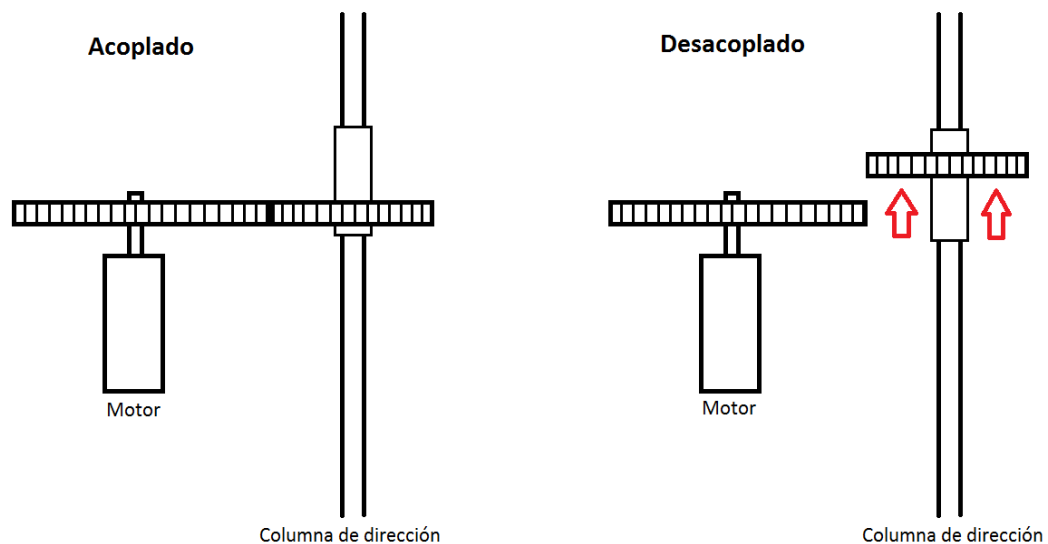


Figura 112. Funcionamiento del mecanismo ideado

Esta idea presentaba varios inconvenientes. El primero era que sería complejo diseñar un sistema mecánico que desengranara la rueda dentada, ya que para ello se necesitaría que el sistema actuara con fuerza elevada y con mucha precisión a la hora de sacar o meter el engranaje. El segundo era que se dudaba de la facilidad para engranar la rueda dentada. Para desconectar el engranaje solo se necesita fuerza para superar el rozamiento de los dientes, pero para volverlo a engranar se necesita en primer lugar posicionar la rueda dentada en la posición exacta para que los dientes entren y luego superar la fuerza de fricción entre los dientes. No es una tarea fácil, porque para que el engranaje no tenga juego, los dientes deben de estar ajustados a la décima de milímetro. Este último inconveniente se podría haber solucionado utilizando engranajes cónicos, pero esta opción se consideró imposible debido al poco tiempo del que se disponía para diseñar y construir el coche (este tipo de componentes se suelen encargar a medida y tardan tiempo en servirlo), a que son componentes excesivamente caros (mirando opciones las opciones más baratas no bajaban de 150€ de media por cada rueda dentada) y a la dificultad de conseguirlos en Moscú. Por todos estos inconvenientes se descartó esta opción y se empezó a estudiar la siguiente idea.

En lugar de desacoplar una rueda dentada de la otra, se empezó a pensar en la opción de desacoplar una rueda dentada de su eje. Esta opción serviría en teoría con cualquiera de las dos ruedas dentadas, pero debido a que el eje motriz del motor es muy corto se decidió que no había suficiente espacio allí como para montar un sistema que desacoplara/acoplara la rueda dentada a este eje. Por ello se decidió estudiar este sistema para la rueda dentada de la columna de la dirección.

Para llevar a cabo esta idea es necesario encontrar una solución para que en el modo automático la rueda dentada gire solidaria con la columna de dirección y para que en el modo manual esta no gire y que la columna de dirección gire en su interior. Es decir, es necesario encontrar un sistema que permita tener diferentes velocidades angulares entre la rueda dentada y la columna de dirección, pero que a la vez permita la posibilidad de bloquear una con la otra. Para ello se ha ideado conectar la rueda dentada con la columna de dirección mediante rodamientos y diseñar un sistema que bloquee la rueda con la dirección. Para bloquear la rueda dentada con la columna de dirección se pensó en utilizar solenoides. Se trata de un componente electromagnético al cual al aplicarle una diferencia de potencial y hacer circular corriente continua a través de él, desplaza una corredera.

Existen muchos tipos de solenoides, los cuales se diferencian por diferentes variables: voltaje nominal, desplazamiento de la corredera, dimensiones, fuerza que ejerce, ciclo de trabajo, etc. En la figura 113 se muestra un solenoide de tipo open frame, que es el que se buscaría para la solución

de bloqueo, ya que permite una fácil sujeción al tener el cuerpo rectangular y no tener que crear un soporte específico para sujetarlo.

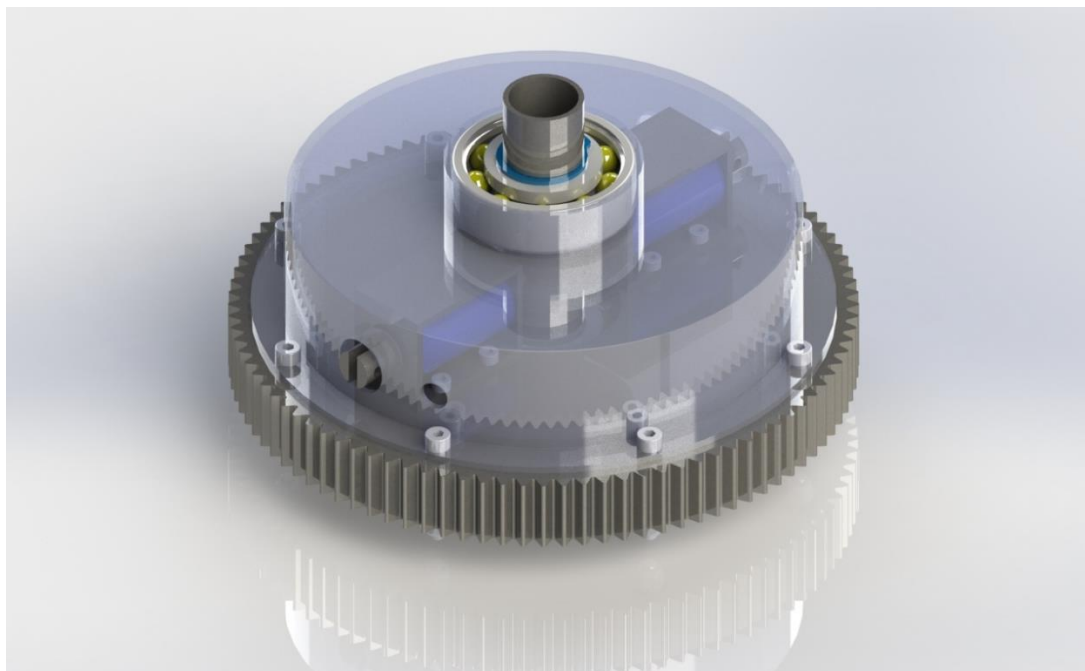


*Figura 113. Solenoide de tipo open frame*

Para el caso del prototipo se buscaba comprar dos solenoides de tipo open frame que trabajaran a 12V con ciclo continuo (100%), que tuviese un desplazamiento de entre 5 y 10 mm, un diámetro del vástago de entre 4 y 8 mm, y que generasen como mínimo 10N de fuerza. A todo ello, que las dimensiones del solenoide fuesen lo más reducidas posibles. En el apartado 10 del Anexo se muestran las especificaciones técnicas de un par de modelos de solenoides que se consideraron adecuados y se intentaron comprar.

En la figura 114 se muestra el modelo del primer sistema de acoplamiento/desacoplamiento diseñado. En esta opción todavía no se había descartado el uso de engranajes. En la imagen se muestra la tapa de los solenoides con transparencia para poder apreciar los solenoides en su interior.





*Figura 114. Modelo del primer sistema de acoplamiento/desacoplamiento diseñado*

El sistema consta de: una rueda dentada, dos rodamientos radiales de bolas, dos solenoides, una tapa estructural para los solenoides (es estructural porque aloja el rodamiento superior), una montura cilíndrica que va entre los rodamientos y la columna de dirección, dos anillos retenedores, así como de tornillería para fijar los componentes. El rodamiento inferior va alojado en la rueda dentada. En el apartado 11 del Anexo se muestra una vista de explosión donde se aprecia mejor el montaje del sistema.

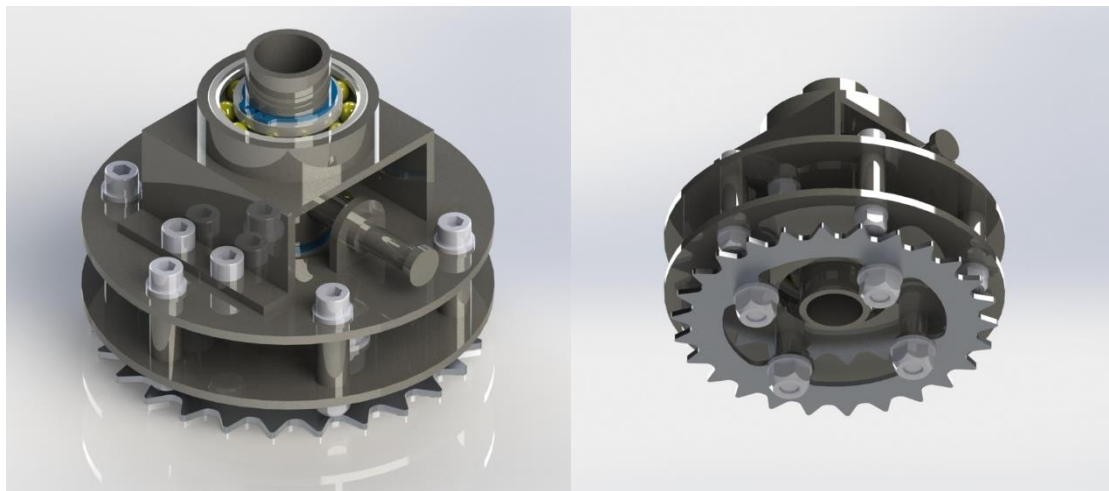
Cuando se descartó la idea de utilizar engranajes y se decidió utilizar ruedas dentadas de bicicleta como sistema de transmisión, la idea del sistema de acoplamiento/desacoplamiento de la transmisión se mantuvo ya que simplemente había que hacer algunos ajustes en algunos componentes.

Lamentablemente, a dos semanas de la presentación del prototipo, se tuvo que decidir prescindir de los solenoides. Se había intentado encontrar estos componentes por todo Moscú y no hubo manera de conseguirlos a tiempo para la presentación del prototipo. Se consiguió encontrar un modelo de solenoide que se adecuaba a las necesidades del prototipo en la empresa Delta Electronics, con oficina en Moscú (bibliografía [5]), pero iban a tardar de dos a cuatro semanas en servirlo ya que lo tenían que importar desde Estados Unidos. Aparte, al pedir solo dos componentes el precio se encarecía mucho, ya que nos querían cobrar 2600 rublos por cada uno, un precio

excesivamente caro para este tipo de componentes. Si añadimos que no se tenía experiencia en trabajar con este tipo de componentes, que no se sabía si realmente servirían bien para realizar la función de bloqueo de la rueda dentada con la columna y que no quedaban días para testarlos y hacer pruebas con ellos, se decidió prescindir de estos componentes y buscar una manera alternativa más sencilla de bloquear la rueda dentada con la columna de dirección.

Ya que la función era simplemente bloquear los dos componentes para que tuvieran la misma velocidad angular, se decidió realizar la función que hubiesen realizado los solenoides de manera manual, simplemente bloqueando ambos componentes con un vástago. Cuando se desea conducir el prototipo en modo autónomo hay que poner el vástago y cuando se desea conducirlo en modo manual simplemente hay que sacarlo. No es una solución muy sofisticada y elegante, pero a dos semanas de la presentación del prototipo era necesario empezar a construir el sistema de acoplamiento/desacoplamiento o el prototipo no estaría listo para el 21 de mayo, y eso sí que no era aceptable.

En la figura 115 se muestra el modelo realizado del sistema con la variante para rueda dentada de bicicleta y con el sistema de bloqueo por vástago.



*Figura 115. Modelo del sistema del segundo sistema de acoplamiento/desacoplamiento diseñado*

En el apartado 12 del Anexo se muestra una vista de explosión de esta variante del sistema.

Pero como en la mayoría de proyectos de ingeniería siempre surgen más imprevistos de los que uno se puede imaginar. A una semana y media de la presentación, el equipo de Formula Student MAMI requirió el torno CNC con urgencia y tuvo que utilizarlo todo el día en que la producción de esta máquina estaba destinada a hacer estas piezas del sistema de acoplamiento. Este hecho hizo

que no se pudiesen crear estas piezas, ya que hasta pasada la presentación del prototipo, el torno CNC tenía la producción ocupada. La mayoría de piezas como los separadores (ver vista de explosión del apartado 12 del Anexo) se podían realizar en el torno convencional o con la máquina de corte por agua, pero el problema residía en las piezas que alojan a los dos rodamientos, así como la montura de estos (ver apartado 12 del anexo). Estas piezas requieren de una precisión de 0,05mm como mínimo para tener un buen ajuste con el rodamiento, algo que no se puede conseguir con el torno manual ya que este solo da precisión de 0,1mm. Además, las ranuras para los anillos retenedores no se pueden hacer con el torno convencional ya que son de una anchura de 1,3mm, algo que no se puede conseguir con las herramientas del torno convencional. Debido a todos estos inconvenientes hubo que buscar una solución de emergencia. Esta solución de emergencia fue utilizar lo que se conocen como chumaceras. Se trata de rodamientos radiales que ya vienen en una estructura de hierro sólida. Solo es necesario atornillarlo al sitio que se desee. Así que un gran grupo de gente estuvo buscando las chumaceras que necesitábamos por todo Moscú durante un día entero. Al final hubo suerte y se encontraron dos de tipo plano (figura 117) para el sistema de acoplamiento/desacoplamiento de la transmisión y otro del tipo que se muestra en la figura 116, el cual serviría para soportar el primer tramo de la columna de dirección. El segundo tramo de la columna de dirección se ha sostenido con el soporte y el rodamiento original de la columna de dirección del vehículo Iguana EVO 2.

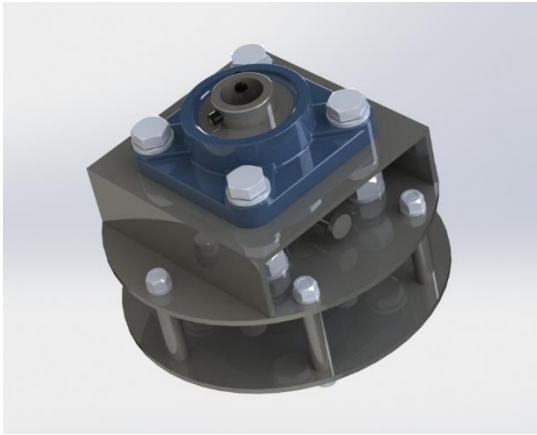


*Figura 116. Chumacera utilizada para soportar la columna de dirección*

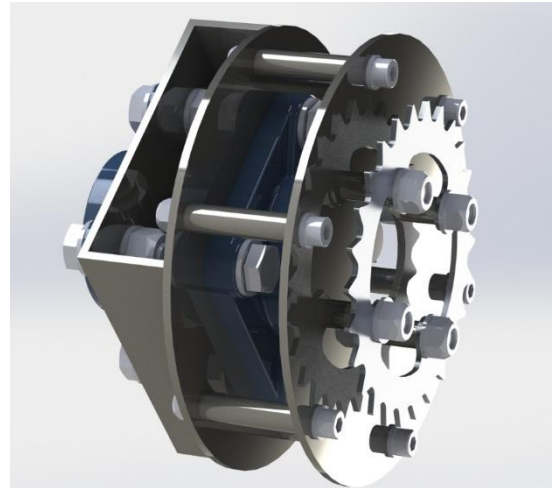


*Figura 117. Chumacera de tipo plano*

Una vez conseguidos estos rodamientos, se adaptó el sistema para utilizar estos componentes. En la figura 118 y 119 se muestra el modelo final del sistema de acoplamiento/desacoplamiento del motor eléctrico de la dirección, el cual ha sido el que se ha fabricado.

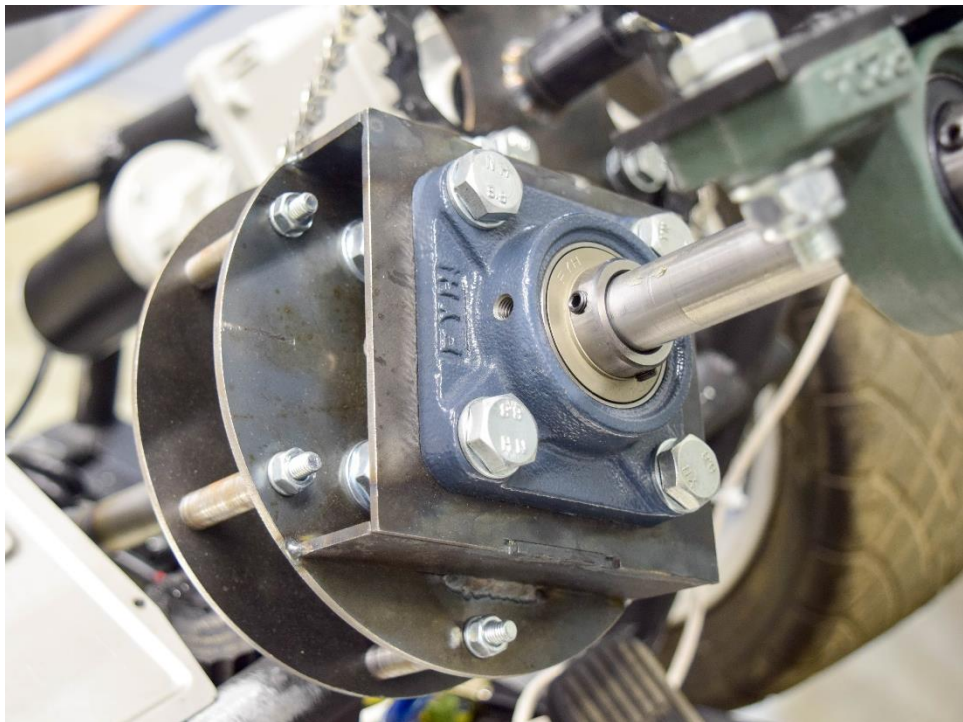


*Figura 118. Modelo final del sistema de acoplamiento/desacoplamiento*



*Figura 119. Modelo final del sistema de acoplamiento/desacoplamiento*

En apartado 13 del Anexo se muestra una vista de explosión del modelo final. En la figura 120 se puede ver una fotografía del sistema finalmente construido y ensamblado en el prototipo.



*Figura 120. Sistema de acoplamiento/desacoplamiento finalmente construido*

Al utilizar las chumaceras, el número de piezas a hacer con el torno se redujo drásticamente. Solo se tuvieron que hacer con el torno los 6 separadores de las dos estructuras principales, los 4 separadores de la rueda dentada y el vástago que bloquea la columna de dirección con el cuerpo

del sistema de acoplamiento/desacoplamiento. El resto de piezas que conforman la estructura se han realizado con la máquina de corte por agua.

Este sistema ha resultado ser un éxito, ya que cumple perfectamente con su cometido y es más simple, ligero y barato que la mayoría de alternativas que se habían barajado con anterioridad. Gracias a este sistema se puede disfrutar del prototipo como un coche eléctrico más y conducirlo hasta el sitio de pruebas, y una vez allí simplemente hay que acoplar el motor de la dirección, conectar la computadora y dejar que el coche se conduzca autónomamente.

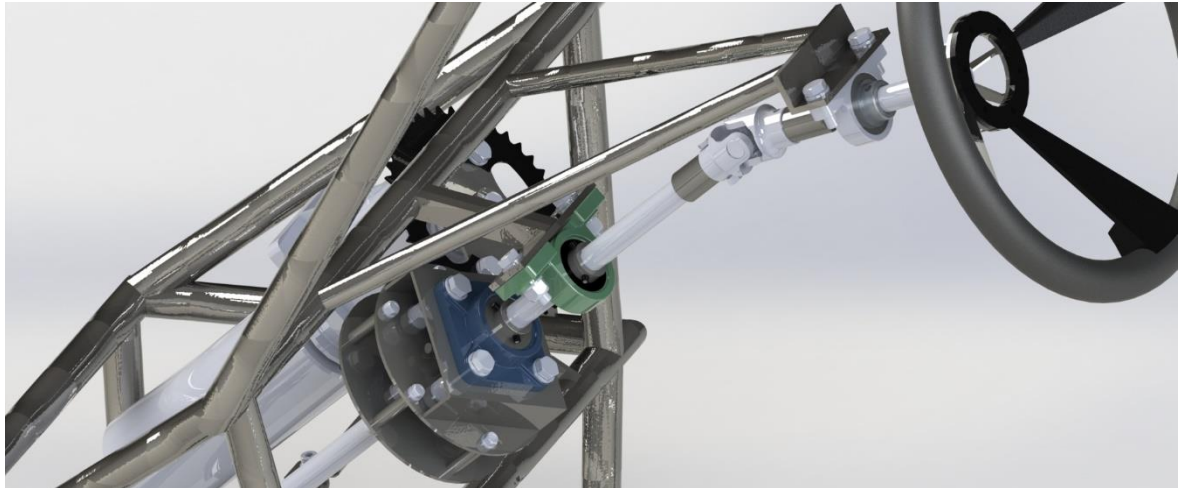
Aunque la solución del vástago para bloquear la columna de dirección con la transmisión del motor hace su función perfectamente y sirvió para poder tener el coche listo para su presentación el día 21 de mayo de 2016, es una solución poco sofisticada y elegante, además de que no es tan cómoda como simplemente apretar un botón para acoplar y desacoplar el motor de la dirección, que era lo que se pretendía. Es por ello que para un futuro se quiere adquirir un par de solenoides, testear esta tecnología, evaluar si es apta para el sistema de acoplamiento/desacoplamiento del motor, y si se le vieran posibilidades de éxito, en ese caso se rediseñaría el sistema con los solenoides, se volvería a fabricar y se implantaría en el prototipo.

### 8.7. Resultado final

Después de realizar pruebas tanto en el modo de conducción manual, como en el modo de conducción autónomo (sin llegar a ser completamente autónomo, simplemente conduciendo el coche con las teclas del ordenador, ya que a fecha de la entrega de esta memoria todavía no se ha conseguido que el coche se conduzca autónomamente) se ha concluido que el sistema de dirección funciona correctamente. Hasta el momento no ha dado ningún tipo de fallo.

En la figura 121 se puede ver una imagen del modelo del sistema de dirección en el que se aprecia con claridad el sistema de acoplamiento/desacoplamiento del motor y los dos soportes de la columna de dirección.





*Figura 121. Modelo del sistema de dirección del prototipo*

En la figura 122 se puede ver una imagen de la misma zona del vehículo pero en el prototipo construido.



*Figura 122. Sistema de dirección del prototipo construido*

En la figura 123 se puede ver una fotografía de la vista frontal del vehículo, en la que se puede apreciar casi todos los componentes que forman el sistema de dirección del vehículo.



*Figura 123. Vista frontal del prototipo construido*

Esta fotografía se ha tomado con posterioridad a la presentación del prototipo. Es por ello que se puede ver la batería alojada en el frontal del coche, ya que posteriormente a la presentación se propuso situar la batería en esa posición para intentar mejorar el reparto de pesos.

## 9. SISTEMA DE FRENADO

### 9.1. Concepto general del sistema

Como se ha comentado anteriormente, el prototipo ha de tener dos modos de conducción: uno autónomo y uno manual. Eso implica que el coche debe de poder ser frenado tanto en un modo manual de manera mecánica por el conductor, ya sea mediante un pedal de freno o una palanca de freno de mano, y también debe de poder ser frenado a través del computador.

En la actualidad existen muchos tipos de sistemas de frenado para automóviles, pero para el caso del prototipo no ha habido mucha posibilidad de elección del tipo de frenos. Como ya se ha mencionado anteriormente el eje rígido trasero que se ha utilizado incorpora unos frenos de tambor accionados mecánicamente. En cuanto a los frenos delanteros, tal y como se ha comentado también anteriormente en el apartado 7, se ha utilizado la mangueta del vehículo Iguana EVO 2, por lo que también se han utilizado sus discos y pinzas de freno hidráulicas así como también el cilindro hidráulico que las acciona.

Todo esto no implica que no haya habido trabajo en el diseño del sistema de frenos del vehículo autónomo. No ha habido trabajo en la elección de estos frenos, pero sí en el diseño y el concepto de cómo accionarlos, ya que como se ha dicho debe haber un modo manual y un modo autónomo de accionar estos frenos.

Como el prototipo no va a ir a alta velocidad (como máximo a 40 km/h) no es necesario hacer frenar el coche con los cuatro frenos a la vez. Es por ello que durante la fase de diseño del coche se ha decidido que los frenos delanteros solo se actúen mediante el computador y que los frenos traseros solo se actúen mecánicamente mediante una palanca de freno de mano.

### 9.2. Sistema de frenos trasero

El hecho de que el eje rígido trasero ya llevara incorporados frenos de tambor ha simplificado mucho el diseño del sistema de frenos trasero. En la figura 124 y 125 se muestra los frenos de tambor que incorpora el eje rígido trasero.



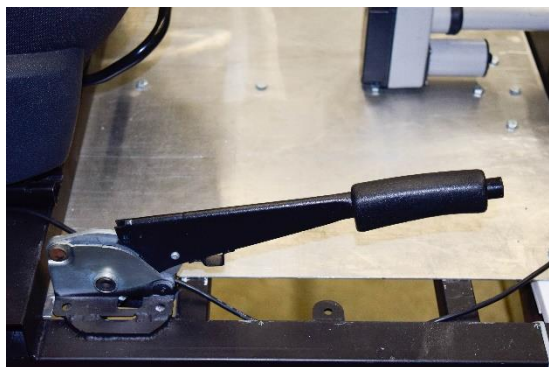


*Figura 124. Tambor de freno*



*Figura 125. Tambor de freno*

En las imágenes se puede observar la palanca que hace actuar el freno de tambor. Este tipo de freno está diseñado para ser actuado mecánicamente, es decir mediante un cable. Realizar un sistema hidráulico que accionara la palanca que actúa los frenos de tambor hubiese sido muy costoso, complicado y posiblemente no hubiese funcionado bien. Es por ello que se escogió la opción del cable. Este cable se ha decidido que se actúe mediante una palanca de freno de mano situada al lado derecho del asiento del conductor. En la figura 126 se muestra en detalle la palanca del freno de mano y en la figura 127 la situación de la palanca en el coche.



*Figura 126. Palanca del freno de mano*



*Figura 127. Situación de la palanca del freno de mano*

Para actuar los frenos de tambor se necesitan dos tramos de cable de acero especial para frenos de mano. Uno que une los dos tambores de manera poco tensa y otro que va unido a la palanca de freno por un extremo y por el otro extremo tensa el primer cable que une los tambores desde el medio del vehículo. Este montaje es necesario para que ambos tambores reciban la misma fuerza de frenado. En la figura 128 se muestra un esquema de este montaje. En azul se muestra el cable que une los dos tambores y en rojo el cable que une desde el centro el primer cable con la palanca de freno. Para hacer la función de estos dos cables se han buscado estos dos componentes del

vehículo Lada Niva, el cual utiliza el mismo sistema de freno de mano. En la figura 129 se muestra el cable que se ha adquirido para unir los tambores.

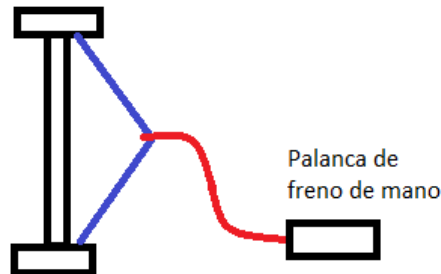


Figura 128. Esquema del freno de mano



Figura 129. Cable del freno de mano

Lamentablemente, el segundo cable, el que une desde el centro el cable de los tambores con la palanca de freno (en rojo en el esquema de la figura 128) no llegó a tiempo para la presentación del prototipo. Es por ello que no se pudo montar el sistema de frenos traseros para la presentación. Se planea adquirir el cable que falta y ensamblarlo en el prototipo para el verano de 2016.

De todas maneras, el sistema de frenos delantero, el cual frena el vehículo en modo autónomo sí que estuvo listo para la presentación. Dado que este prototipo es un vehículo para testear la tecnología de conducción autónoma, el sistema de frenos que más importa es el que permita frenar el coche en modo autónomo.

### 9.3. Sistema de frenos delantero

Como se ha mencionado en el apartado 9.1, para los frenos delanteros del vehículo se han reutilizado del vehículo Iguana EVO 2 los discos de freno, las pinzas de freno (o calipers en inglés), el circuito hidráulico y el cilindro hidráulico que presiona el líquido de freno en el circuito. Este hecho ha sido una gran ventaja, no solo por el tiempo que se ha ahorrado en el diseño del vehículo, sino por la gran cantidad de dinero que se ha ahorrado, ya que estos componentes son muy caros. En la figura 130 se muestran los discos y pinzas de freno del vehículo Iguana EVO 2 ensamblados en el prototipo.



*Figura 130. Discos y pinzas montados en el prototipo*

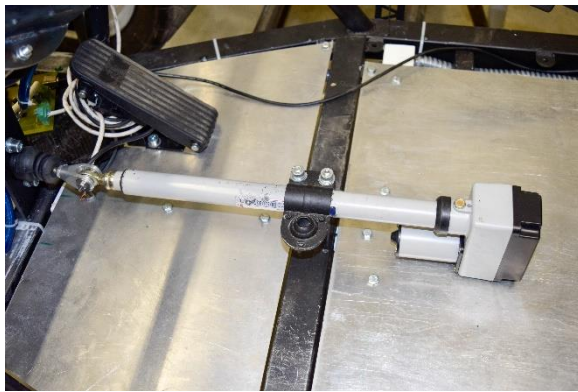
Dado que tanto las pinzas como los discos ya tienen su alojamiento en las manguetas, también originarias del vehículo Iguana EVO 2, el único componente de los que se han reutilizado que ha sido necesario posicionar y fijar ha sido el cilindro hidráulico de freno. Para ello se ha diseñado y fabricado con la máquina de corte por agua un soporte hecho a base de plancha de acero de 5mm de espesor. En la figura 131 se muestra el cilindro fijado a este soporte.



*Figura 131. Cilindro de freno*

Una vez hecho el diseño de los frenos delanteros la única duda era cómo actuarlos de forma autónoma.

En un principio se pensó en utilizar un servo motor que con un cable estirara de un pedal y que este presionara el cilindro hidráulico. Esta idea rápidamente se descartó debido a su complejidad y a que se encontró una alternativa mucho mejor. Se encontró un actuador lineal alimentado a 12 V, capaz de ejercer una fuerza de hasta 3000N y con un recorrido máximo de 100mm, por lo que lo hacía perfecto para el uso que se necesitaba. El modelo del actuador lineal se llama Super Power Jack 100. En la figura 132 se muestra este actuador ensamblado en el prototipo. Para fijar el actuador al vehículo ha sido necesario soldar el soporte de origen del actuador con el bastidor del coche utilizando dos piezas de plancha de acero de 5mm de espesor cortadas con la máquina de corte de agua. En la figura 133 se muestra la fijación que se ha fabricado para el actuador.



*Figura 132. Actuador de los frenos delanteros.*



*Figura 133. Fijación del actuador*

## 10. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

El proceso de construcción se llevó a cabo entre la primera semana del mes de abril y la tercera semana del mes de mayo de 2016. Este proceso abarcó todas y cada una de las piezas del vehículo, ya que no se externalizó ninguna de las etapas de construcción. En este capítulo se comenta con detalle los pasos que se siguieron para completar la construcción, así como los procesos y herramientas empleadas.

### 10.1. Línea de tiempo.

En este apartado se comentan, por orden de aparición en el proceso de construcción, los diferentes pasos que se siguieron para llegar a construir el bastidor.

- **Cortado, preparado y posicionado de tubos para su soldadura:** Este primer paso tiene pequeños detalles importantes que se deben tener en cuenta para evitar imperfecciones en el resultado final. En primer lugar, la sierra mecánica con la que se cortaron los tubos precisaba que fueran añadidas unas gotas de aceite a la hoja de corte para facilitar su desplazamiento y evitar que se sobrecaliente. Seguidamente y después de haber comprobado que las medidas del tubo son correctas, se hace un pequeño chaflanado alrededor de los bordes para que al soldar, la adición tenga espacio en el que situarse sin dejar a la vista pequeñas canicas de soldadura, que además de ser antiestéticas pueden crear un punto de menor resistencia. Por último, se limpia la suciedad que ha generado el proceso en el tubo y se posiciona. Con un trapo empapado en disolvente, se limpia el aceite para evitar que este se evapore durante la soldadura, creando burbujas que pueden dejar imperfecciones y salpicar al explotar al soldador. Con la ayuda de unos fijadores, se posicionan los tubos en el lugar en el que están en el modelo, a fin de que la construcción de cómo resultado un bastidor idéntico al diseñado.
- **Soldadura del bastidor:** Con soldadura TIG, cuyos detalles se explican en el apartado 10.3, se hace un pequeño punto de soldadura para fijar los tubos en su posición. Una vez punteados todos lugares donde se va a soldar, se procede a realizar el cordón de soldadura. Se debe proceder con cuidado, ya que aplicar demasiado calor puede deformar el bastidor y si se trabaja intensamente en una zona, podría darse el caso de que la dilatación de ésta afectara a la posición de los demás puntos fijados.





Figura 134. Proceso de soldadura del bastidor.

Una vez realizados estos dos pasos, se dispone de un bastidor sin monturas, al que no se le pueden acoplar componentes. Este momento resulta un tanto crítico, ya que si no se planifican bien los siguientes pasos, éstos pueden generar un cuello de botella que desplace la fecha de finalización del prototipo.

- **Soldadura de las monturas, corrección del modelo y producción de los demás componentes:** Mientras se comprueba que el bastidor que ya está soldado concuerda en medidas con el modelo, se pueden ir posicionando todas las monturas que vayan soldadas al bastidor. Si el bastidor no concordara con el modelo, se podría corregir cualquiera de los dos. En nuestro caso, no fue necesario realizar estas modificaciones. Las monturas, una vez posicionadas, se sueldan mediante un punto de soldadura, al que se le hará un cordón en cuanto se compruebe que los componentes a los que sujetará la montura se ajustan perfectamente a ésta. Al mismo tiempo que todo esto está pasando, se trabaja paralelamente en las diferentes piezas que conectarán con el bastidor mediante estas monturas (por ejemplo, los brazos de la suspensión o la cremallera de dirección).



*Figura 135. Proceso de soldadura de las monturas.*

- **Pulido y pintado del bastidor:** Se procede, una vez realizadas todas las soldaduras que sean necesarias en la construcción del bastidor, a pulir y limpiar a conciencia todos los tubos y esquinas del prototipo
- **Montado de los componentes en el bastidor:** Con las monturas completamente soldadas, se van colocando en la posición correcta los diferentes componentes. Se fijan con tornillería y poco a poco se puede apreciar como el vehículo va cogiendo forma. La importancia de planificar estas etapas finales al no disponer de una grúa elevadora reside en que el peso del vehículo es cada vez mayor, llegando el momento en que tareas que en un principio resultaban sencillas como darle la vuelta al vehículo, se convierten en una auténtica pesadilla.
- **Acabados del prototipo:** Una vez posicionados todos los componentes se puede considerar que el prototipo está terminado, pero debido a que en el lugar donde se ha trabajado genera mucho polvo en el ambiente por las tareas que se llevan a cabo en él y por los pequeños golpes que pueda haber recibido el vehículo en el montaje, se procede a limpiar todo el coche con un trapo humidificado con un producto que no dañe la pintura y se corrigen las posibles muescas que se hayan realizado accidentalmente durante el montaje.

## 10.2. Materiales empleados en el proceso de construcción:

- **Tubos de perfil tubería 30x2 y cuadrado 40x40x2 de acero:** Para crear el bastidor, se empleó tubos de acero extruido.
- **Tornillería de calidad mínima 8.8:** Estos tornillos son de mayor calidad de los que podemos emplear en reparaciones domésticas y es el estándar mínimo empleado en automoción. Se

necesitan tornillos que sean resistentes no solo a las cargas que se apliquen, sino también al desgaste producido por las vibraciones de un vehículo en movimiento, causantes de fricción entre componentes y deterioro de la tornillería. En caso de usar tornillos de calidad inferior a la comentada, podrá darse el caso de que la vida útil de estos sea muy corta, poniendo en riesgo el acople de los componentes.

- **Planchas de aluminio:** Para las planchas que forman el suelo, se emplearon planchas de este aluminio aleado, que tiene gran dureza por la combinación de los elementos que lo forman y muy poca elasticidad, para evitar que las planchas deformen por su uso.

### 10.3. Herramientas y maquinaria usada en el proceso de construcción:

- **Máquina de corte por agua (WaterJet):** El proceso de corte por agua fue empleado en la construcción de prácticamente todas las monturas, así como también del suelo. Ofrece una precisión muy buena, así como la ventaja de que al no emplear calor para realizar el corte (emplea agua a alta presión combinada con un abrasivo), no altera las propiedades del material en los bordes de corte.
- **Soldadura TIG:** Emplea un electrodo de tungsteno y necesita aportación externa. A pesar de que puede ser un proceso de soldadura algo más caro que otros, ofrece la gran ventaja de unas calidades muy buenas. Además, al ser una soldadura de precisión, la zona calentada es relativamente pequeña, afectando así en pequeña medida las propiedades de las piezas a unir en las zonas colindantes al cordón de soldadura. A pesar de ser una soldadura muy limpia, el gas inerte y el polvo ambiente dejan suciedad en la capa superior de la soldadura, que hacen recomendable limpiar el cordón con un cepillo metálico y un trapo humidificado.
- **Sierra de cinta:** Para el corte de los tubos se empleó una sierra de cinta que permitía el giro de la hoja e indicaba el ángulo de corte, facilitando así este proceso. Únicamente requería la aportación de un fluido lubricante para evitar el sobrecalentamiento tanto de la hoja como del material, que al final del proceso debía ser retirado con disolvente.
- **Rectificadora de banda:** Esta máquina se emplea para hacer incisiones a los tubos y permitir que encajen entre ellos por partes que no sean los extremos. Un ejemplo puede ser visto en la cruz del techo, donde en los extremos se requirió el uso de esta máquina para que se acoplaran perfectamente en los extremos.



- **Torno convencional y torno CNC:** Para las piezas sencillas de revolución, se empleó un torno convencional. Cuando las piezas requieren más precisión o son más difíciles de producir, se emplea una máquina de control numérico.



*Figura 136. Preparado del torno antes de la realización de una pieza.*

## 11. PLANIFICACIÓN

En cualquier proyecto de ingeniería es necesario realizar una correcta planificación al inicio y realizar el máximo esfuerzo por seguir dicha planificación durante las diferentes etapas que lo componen, pero en el proyecto del vehículo autónomo ha tenido una especial importancia. Este hecho se debe a que era necesario que el coche estuviera construido para el día 21 de mayo de 2016, ya que ese día había puertas abiertas en la universidad de MAMI y era necesario mostrar al público todos los proyectos de ingeniería que se habían realizado durante el año.

Se suma el inconveniente de que debido a temas administrativos se llegó a Moscú el 29 de febrero, bastante más tarde de lo deseado, y a que hasta el 24 de marzo no se nombró a los autores de esta memoria como líderes y responsables de la parte mecánica del proyecto. Todos estos hechos hacen que haya sido necesario diseñar y construir el prototipo en tan solo 58 días, poco más de un mes y medio.

Por todo ello ha sido necesario trabajar muy duramente y con dedicación completa al proyecto durante estos 58 días y realizar el máximo esfuerzo por no retrasarse en la planificación realizada del proyecto.

Para ilustrar esta planificación, se ha realizado un diagrama de Gantt (figura 137) en el cual se muestran las principales tareas del proyecto y sus fechas de realización. Para ilustrar mejor las diferentes etapas del proyecto se ha realizado una separación por colores de las tareas según a la fase del proyecto a la cual corresponden. En la gráfica 4 se muestra el porcentaje de tiempo empleado a cada tarea y en la tabla 4 se puede observar la fecha de inicio, la fecha de fin y la duración de cada tarea.

Tabla 4. Tareas del proyecto

| Tareas  | Fecha de inicio | Duración | Fecha de fin |
|---|-----------------|----------|--------------|
| Trámites administrativos para legalizar la estancia en Moscú                            | 29/02/2016      | 3        | 03/03/2016   |
| Conocimiento de las instalaciones y el equipo del Formula Student MAMI                  | 02/03/2016      | 2        | 04/03/2016   |
| Información sobre el estado del proyecto  | 03/03/2016      | 1        | 04/03/2016   |
| Adquisición de conocimientos sobre la conceptualización de vehículos (clases con Pablo) | 07/03/2016      | 3        | 10/03/2016   |
| Adquisición de conocimientos sobre la dinámica del automóvil                            | 11/03/2016      | 13       | 24/03/2016   |
| Adquisición de conocimientos sobre cómo realizar simulaciones en Solidworks 2015        | 11/03/2016      | 13       | 24/03/2016   |
| Redactado del prefacio, introducción y evaluación previa del proyecto                   | 24/03/2016      | 8        | 01/04/2016   |
| Diseño del bastidor   | 24/03/2016      | 27       | 20/04/2016   |
| Simulaciones del bastidor   | 12/04/2016      | 10       | 22/04/2016   |
| Diseño de la suspensión   | 24/03/2016      | 21       | 15/04/2016   |
| Diseño del sistema de dirección   | 15/04/2016      | 28       | 13/05/2016   |
| Diseño del sistema de frenos  | 26/04/2016      | 8        | 04/05/2016   |
| Fabricación del bastidor  | 20/04/2016      | 23       | 13/05/2016   |
| Fabricación de los componentes de la suspensión   | 04/05/2016      | 8        | 12/05/2016   |
| Fabricación de los componentes de la dirección  | 09/05/2016      | 9        | 18/05/2016   |
| Pintado del bastidor  | 18/05/2016      | 1        | 19/05/2016   |
| Ensamblaje de todos los componentes en el bastidor                                      | 19/05/2016      | 2        | 21/05/2016   |
| Redactado del bastidor  | 24/05/2016      | 18       | 12/06/2016   |
| Redactado del diseño conceptual del vehículo  | 24/05/2016      | 3        | 27/05/2016   |
| Redactado del sistema de suspensión   | 27/05/2016      | 8        | 04/06/2016   |
| Redactado del sistema de dirección  | 04/06/2016      | 8        | 12/06/2016   |
| Redactado del sistema de frenos   | 12/06/2016      | 4        | 16/06/2016   |
| Redactado del proceso de construcción   | 12/06/2016      | 4        | 16/06/2016   |
| Redactado de la optimización y del impacto medioambiental                               | 16/06/2016      | 7        | 23/06/2016   |
| Redactado de la planificación, análisis económico y conclusiones                        | 16/06/2016      | 7        | 23/06/2016   |
| Preparación presentación oral   | 23/06/2016      | 6        | 29/06/2016   |
| Presentación oral   | 29/06/2016      | 1        | 30/06/2016   |

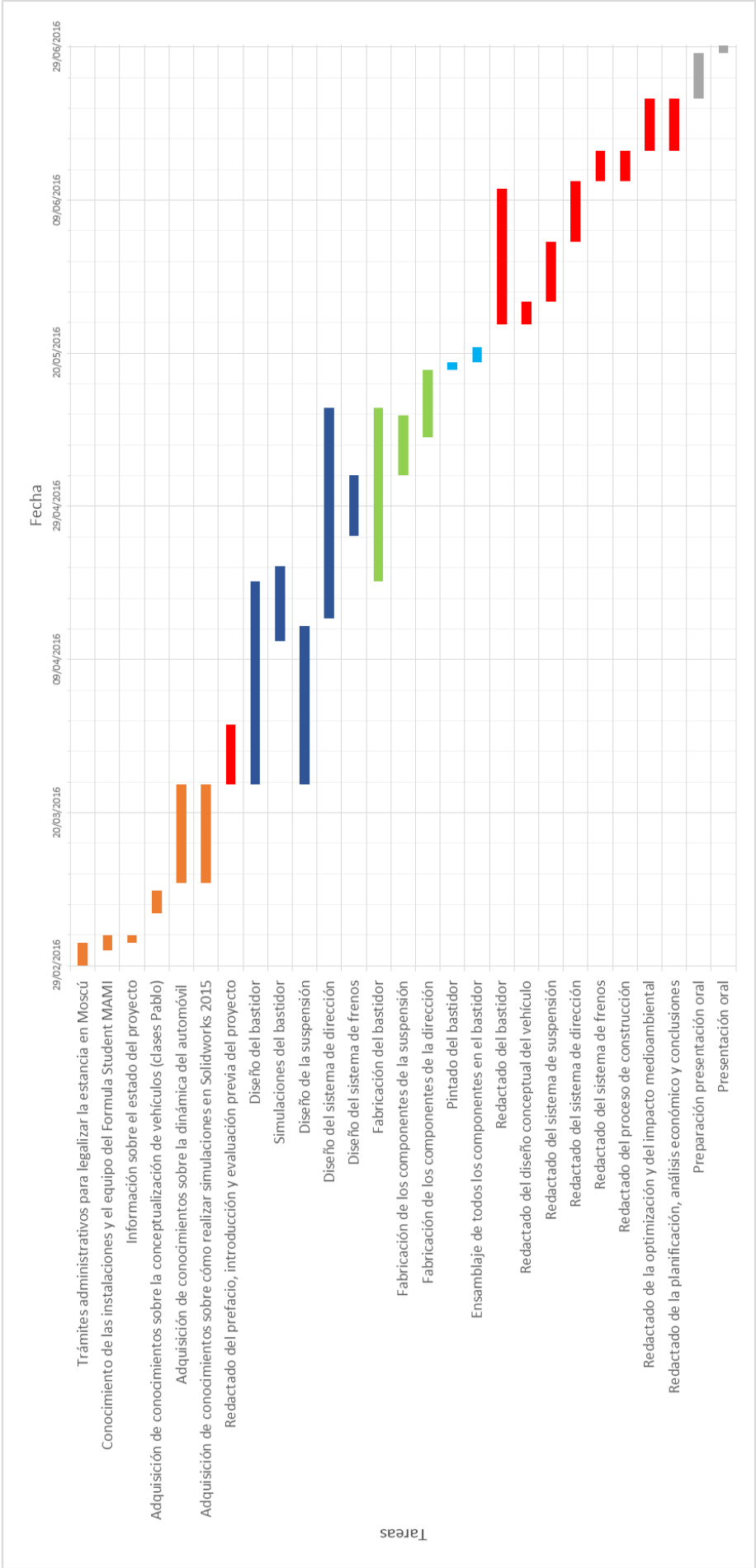
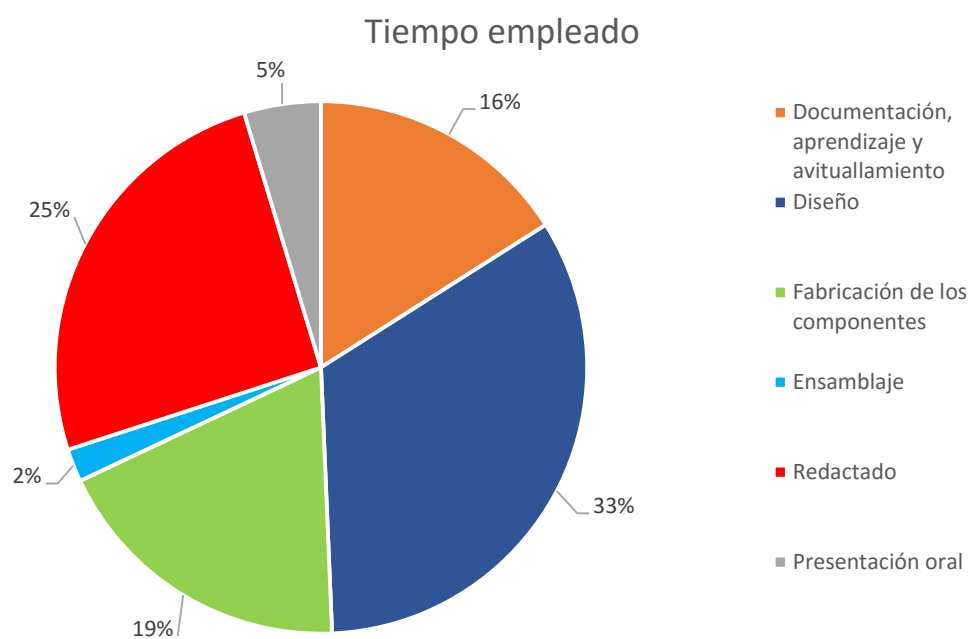


Figura 137. Diagrama de Gantt



Gráfica 4. Tiempo empleado en cada tipo de tarea

## 12. ANÁLISIS DE LOS RECURSOS ECONÓMICOS

Para realizar este proyecto, desde el primer momento se tuvo en cuenta el uso austero de los recursos de los que se disponía. Por una parte, se quería evitar que faltara dinero en alguna etapa del proyecto, pero a la vez se quería impedir el despilfarro absurdo que podría resultar de tener un cheque en blanco. Se realizó un balance de costes de todos los componentes comprados al final del mismo, de todas las horas de trabajo realizadas y de otros gastos también importantes, así como de las licencias del software empleado y gastos administrativos. Al haber sido el proyecto realizado en un país extranjero con una moneda extracomunitaria, donde se han usado euros, dólares y rublos como moneda de cambio, se hace un cálculo aproximado del valor del euro a lo largo de estos últimos meses. Por ello, se presuponen los valores siguientes constantes para todas las compras realizadas: 1 EURO = 73 RUBLOS = 1,11 DÓLARES

Se realizó el análisis en tres partes separadas. En la primera, se tienen en cuenta únicamente los materiales empleados, los componentes adquiridos y los componentes adquiridos antes de la adquisición del proyecto. En el segundo se consideran los salarios de las personas que han trabajado en este proyecto valorados en la ciudad de Moscú. Por último, en la tercera parte, se consideran los gastos administrativos, así como vuelos, licencias, ordenadores y otros costes.

En los apartados siguientes:

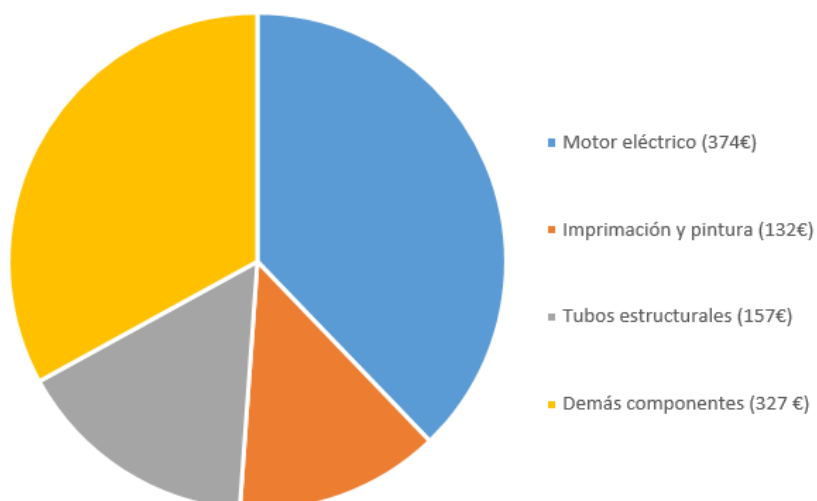
- Los salarios de los ingenieros están calculados según lo que cobra un ingeniero en Barcelona cuando ya está graduado.
- Los salarios de taller son acordes al salario que obtienen por hora los trabajadores que estaban en el mismo taller donde se construyó el prototipo.
- Los costes del uso de la maquinaria, son los que aplica la universidad MAMI a los pedidos externos.
- Los precios de los visados son las tasas que cobra la embajada rusa por su trámite. No hay agencias de por medio.

## 12.1. Coste de los materiales empleados

Tabla 5. Coste detallado de los materiales empleados.

| Material                      | Unidades    | Precio unitario (IVA incluido) | Total en euros |
|-------------------------------|-------------|--------------------------------|----------------|
| Motor eléctrico eje trasero   | 1           | 416 USD/u                      | 375            |
| Controlador del motor         | 1           | 90 USD/u                       | 81             |
| Pedal acelerador              | 1           | 32 USD/u                       | 29             |
| Tubería 30x2                  | 17,7 metros | 450 RUB/m                      | 108            |
| Perfil cuadrado 40x40x2       | 8,5 metros  | 336 RUB/m                      | 39             |
| Perfil cuadrado 20x20x2       | 1,9 metros  | 395 RUB/m                      | 10             |
| Cadena de bicicleta           | 1           | 850 RUB/u                      | 12             |
| Plato de bicicleta 42 dientes | 1           | 950 RUB/u                      | 13             |
| Plato de bicicleta 26 dientes | 1           | 200 RUB/u                      | 3              |
| Llantas de 15 pulgadas        | 2           | 1600 RUB/u                     | 44             |
| Freno de mano                 | 1           | 505 RUB/u                      | 7              |
| Stop Area Ring 16mm           | 10          | 69 RUB/u                       | 9              |
| Stop Area Ring 19mm           | 10          | 69 RUB/u                       | 9              |
| Pintura e imprimación         | 10          | 970 RUB/u                      | 132            |
| Tornillería                   | TOTAL       | 3700 RUB                       | 50             |
| Cojinete esférico plano GE8C  | 2           | 10,39 € /u                     | 22             |
| Cojinete esférico plano GE10C | 2           | 10,22 € /u                     | 20             |
| Gastos de envío               | TOTAL       | 31 USD                         | 28             |
|                               |             | <b>COSTE TOTAL EN EUROS</b>    | <b>991</b>     |

Distribución del coste del material



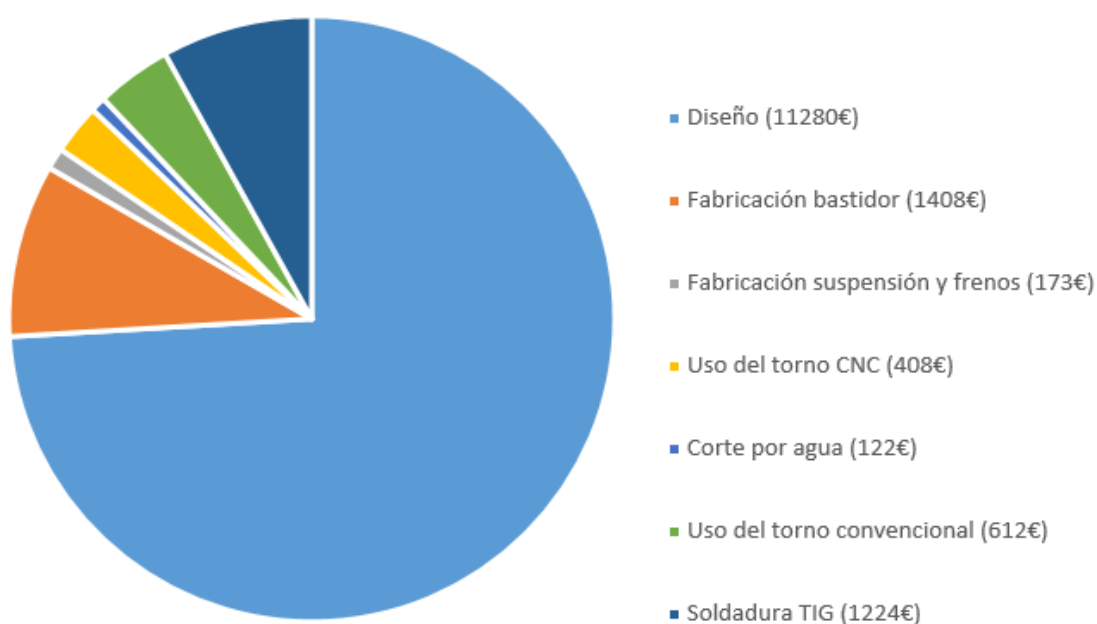
Gráfica 5. Distribución del coste del material.

## 12.2. Coste de las horas dedicadas

Tabla 6. Coste detallado de las horas dedicadas.

| Servicio                          | Horas | Euros por hora | Rublos por hora | Dólares por hora | Total en euros |
|-----------------------------------|-------|----------------|-----------------|------------------|----------------|
| Diseño                            | 564   | 20             |                 |                  | 11280          |
| Fabricación bastidor              | 138   |                | 750             |                  | 1408           |
| Fabricación suspensión y frenos   | 17    |                | 750             |                  | 173            |
| Uso del torno CNC                 | 10    |                | 3000            |                  | 408            |
| Corte por agua                    | 3     |                | 3000            |                  | 122            |
| Uso del torno convencional        | 30    |                | 1500            |                  | 612            |
| Soldadura TIG                     | 40    |                | 2250            |                  | 1224           |
| COSTE TOTAL DE LAS HORAS EN EUROS |       |                |                 |                  | 15229          |

### Distribución del coste de las horas



Gráfica 6. Distribución del coste de las horas dedicadas.

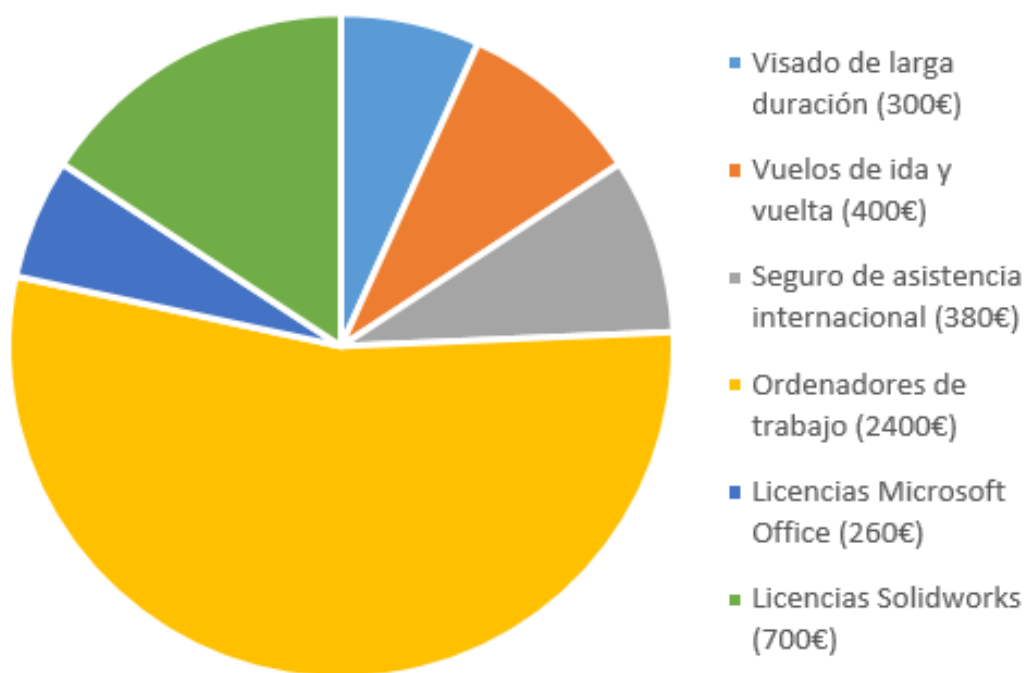


### 12.3. Otros gastos del proyecto

Tabla 7. Coste detallado de otros gastos del proyecto.

| Concepto                                  | Unidades | Precio unitario (IVA incluido) | Total en euros |
|---|----------|--------------------------------|----------------|
| Visado de larga duración (300€)           | 2        | 150 €                          | 300            |
| Vuelos de ida y vuelta (400€)             | 2        | 200 €                          | 400            |
| Seguro de asistencia internacional (380€) | 2        | 190 €                          | 380            |
| Ordenadores de trabajo (2400€)            | 2        | 1.200 €                        | 2400           |
| Licencias Microsoft Office (260€)         | 2        | 130 €                          | 260            |
| Licencias Solidworks (700€)               | 2        | 350 €                          | 700            |
| COSTE TOTAL EN EUROS                      |          |                                | 4440           |

### Distribución del coste de otros gastos



Gráfica 7. Distribución del coste de otros gastos del proyecto.

#### 12.4. Coste total

El coste total del desarrollo del proyecto fue de 20660 €. Si bien podría parecer un valor excesivamente elevado, hay que tener en cuenta que el desarrollo de una única unidad siempre es mucho más caro que los vehículos producidos en serie. El hecho de haber separado los costes en tres partes diferentes, es debido a que será más sencillo evaluar cómo evolucionará el coste del producto al ser producido en serie. Sin entrar en detalle, se pueden hacer las siguientes suposiciones:

- **Coste de los materiales empleados:** Los materiales reducirán su precio al ser comprados al por mayor, aunque no de forma excesiva. Se calcula que la compra al por mayor puede resultar en un descuento de hasta el 50% sobre el precio al por menor.
- **Coste de las horas dedicadas:** Se reducirá de forma abultada. Los costes del diseño, que suponen prácticamente tres cuartas partes de este gasto, se repartirán entre el número de unidades producidas. Los demás gastos podrían reducirse con el tiempo por la mayor habilidad de los empleados o mediante la estandarización en la producción de la mayoría de las piezas.
- **Otros gastos del proyecto:** Estos gastos se suelen amortizar con el paso del tiempo. Al igual que el diseño, se reparte entre todas las unidades que se produzcan del prototipo.

## 13. ANÁLISIS DE IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

La realización de un análisis de impacto medioambiental tiene como objetivo valorar el daño que generará un producto desde la extracción de las materias primas y el procesado de estas hasta el de los residuos que generará al final de su vida útil. Se ha considerado, más que el caso particular del primer modelo, qué afectaciones tendría en el entorno la producción masiva de un vehículo como el desarrollado por los autores de esta memoria, aunque eso sí, sin entrar en cálculos o de. Se considera que para enfocar correctamente este análisis, se deben tener en cuenta las siguientes amenazas:

- **Impacto de las materias primas:** La extracción de metales del suelo mediante la minería podría perjudicar el ecosistema, pero una de las materias primas que se necesitará para la fabricación del prototipo es que más preocupa en su extracción es el coltán. El hecho de que se extraiga en países subdesarrollados, sin preocuparse del entorno, hace que este mineral se extraiga arrasando los montes en los cuales se busca. El mayor problema es que no se puede prescindir de él, ya que es uno de los materiales necesario para la fabricación de componentes electrónicos.
- **Impacto durante la fabricación:** Dependiendo de cómo se enfoque la fabricación del producto, se puede conseguir que la producción de un producto no tenga un gran impacto medioambiental en el lugar en el que se encuentra. Si bien hay normativas tanto nacionales como europeas que protegen el medioambiente, todavía queda mucho por hacer en este sentido. Como ejemplo a seguir, tenemos la fábrica que construyó BMW para la producción de sus vehículos eléctricos, que recibe energía únicamente renovable.
- **Impacto durante su vida útil:** El impacto de un vehículo eléctrico durante su vida útil es inferior al de uno de combustión, no sólo por la mayor eficiencia de los vehículos en el movimiento, si no por sus menores emisiones. Si bien para producir esta energía eléctrica que impulse al vehículo puede polucionar el entorno de la central generadora, el hecho de que esta polución se encuentre en una zona concreta la hace mucho más sencilla de controlar que la que generan los vehículos de combustión por todos los lugares por los que pasan.
- **Impacto al final de la vida útil:** Todo producto genera residuos al final de su vida útil, depende del uso que le sea dado a estos residuos el que sean reciclados o arrojados a un vertedero. La ventaja del reciclado no es únicamente la menor explotación de los recursos

naturales, sino también, en muchos casos, el menor coste de los componentes producidos con material reciclado.

- **Ventajas medioambientales de un vehículo autónomo:** El consumo de gasolina de un vehículo, a pesar de que dependa de otros factores como la forma de conducir, de las revoluciones a las que se lleva el motor e incluso el estado de los neumáticos, se puede aproximar por algo tan sencillo como la consideración de que a mayor distancia recorrida, mayor combustible quemado. Un vehículo autónomo podría tomar siempre la ruta que menos recursos consuma, así como evitar rodeos a la hora de aparcar.

## 14. CONCLUSIONES

Después de una estancia de cuatro meses en Moscú se ha concluido el proyecto. Durante este tiempo se ha diseñado y construido el chasis de un vehículo eléctrico autónomo desde cero, que era el principal objetivo de este proyecto y el motivo por el que la universidad de MAMI había ofrecido realizar este proyecto a estudiantes del ETSEIB; por lo que se puede concluir que se ha realizado el proyecto con éxito.

No solo se ha cumplido el objetivo de construir el coche, sino que el coche se ha construido a tiempo para la presentación del día 21 de mayo de 2016, lo cual era un objetivo también muy importante, sobre todo para la universidad de MAMI, ya que ese día pudieron exponer el coche al público.

Durante estos cuatro meses los autores de esta memoria han adquirido gran cantidad de experiencia, conocimientos y habilidades.

Se ha adquirido experiencia en el campo de la construcción de vehículos, en la gestión de proyectos y en la gestión de recursos humanos. La resolución de los diferentes imprevistos que han surgido a lo largo de todo el proyecto, así como también las decisiones que se han tenido que tomar, han hecho que los autores de esta memoria hayan adquirido mucha experiencia de cara a futuros proyectos.

Se han adquirido conocimientos en los campos de la suspensión, dirección, resistencia estructural del bastidor y en muchos otros campos de la automoción. También se ha adquirido destreza en la utilización de software como Solidworks 2015, no solo en la utilización de este para realizar el modelo virtual del coche, sino también para realizar simulaciones estructurales de sus componentes.

En cuanto a habilidades adquiridas, los autores de esta memoria han aprendido a utilizar el torno convencional, la fresadora, a soldar con soldadura TIG, así como a utilizar la diversa maquinaria que existe en un taller de trabajo y de construcción de prototipos.

Otro gran motivo de satisfacción para los autores de esta memoria es que, a pesar de la complejidad que conlleva diseñar y construir el chasis de un vehículo eléctrico autónomo, todos los elementos que se han diseñado y construido funcionan perfectamente. El coche construido será capaz de aguantar todos los test a los que se le someterá durante los próximos años para poder estudiar la tecnología de conducción autónoma de vehículos.

Todos los objetivos que se han descrito al principio de esta memoria se han cumplido, es por ello que el resultado del proyecto se considera muy satisfactorio. Aunque sí que es verdad que no se ha realizado un estudio de optimización del vehículo tan exhaustivo como el que se imaginaba en un principio.

El hecho de que Pablo Emilio Iturralde propusiera a finales del mes de marzo de 2016 nombrar a los autores de esta memoria como directores del proyecto lo cambio todo. Esto ha implicado tener mucha más responsabilidad en este proyecto y mucha menos supervisión y control por parte de terceros, llegando al punto de que dependiera completamente del trabajo de los autores de esta memoria que el coche estuviera acabado para el día de puertas abiertas en MAMI. Gracias a ello se ha adquirido una experiencia de un valor incalculable en la gestión y en el liderazgo de proyectos, pero también ha hecho que se haya tenido que emplear mucho más tiempo en la supervisión y administración del proyecto y que debido a falta de tiempo no se haya podido realizar un estudio de optimización tan extenso como se hubiese deseado.

## 15. BIBLIOGRAFÍA

### 15.1. Referencias bibliográficas

- [1] JÖRNSSEN REIMPELL, HELMUT STOLL, JÜRGEN W.BETZLER, *The Automotive Chassis: Engineering Principles*, 2nd Edition, (Jordan Hill, Oxford: Butterworth Heinemann), 2001.
- [2] WILLIAM F.MILLIKEN, DOUGLAS L.MILLIKEN, *Race car vehicle dynamics*, (Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, Inc), 1995.
- [3] Website SKF Group. Catálogo de productos. Abril 2016.  
<http://www.skf.com/es/products/index.html>
- [4] Website Aurora Bearing Company. Abril 2016.  
<http://www.aurorabearing.com/index.html>
- [5] Website de la tienda Deltel Electronics. Mayo 2016.  
<http://deltel.ru/>

### 15.2. Bibliografía de consulta

- [6] JOSÉ MARÍA DE JUANA, *Física General*, Volumen 1, 2ª Edición, (Ribera del Loira, Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A), 2003.
- [7] Prof. Dr. -Ing. HARALD MEERKAMM, *Technical Pocket Guide*, 1<sup>st</sup> Edition, (Herzogenaurach, Germany: Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG), Marzo 2014.
- [8] PABLO LUQUE, DANIEL ÁLVAREZ, CARLOS VERA, *Ingeniería del automóvil: Sistemas y Comportamiento Dinámico*, (Madrid, España: Thomson Editores Spain), 2004.
- [9] ORLANDO RÍOS, *La suspensión: Automóviles de competición*, (Barcelona, España: Grupo Editorial Ceac, S.A), 1998.